

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

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

2024

№ 4 (192)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 4 (192) 2024

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 20.11.2024 г.
Дата выхода в свет 29.11.2024 г.

Формат 60x84 1/8.
18,60 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 21
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

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 (АНТИ), Бэньси, Китай

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

МЭН Чжаоцзюнь, доктор, профессор,
Ляонинский научно-технологический институт (АНТИ), 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

ПОПОВ Евгений Владимирович, д. т. н., профессор,
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Нижний Новгород

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,
Нижегородский государственный университет, г. Нижегородск

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 (АНТИ), 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

№ 4 (192) 2024

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
PII № TY55-00559 from 06.10.2017
issued by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology,
and Mass Media, Omsk region

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

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgtsu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgtsu.ru/general_information/media_omgtu/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 20.11.2024
Date of Publication 29.11.2024

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 18,60
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 21
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
- 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
- POPOV Evgeniy Vladimirovich**, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, 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

М. А. Мукутадзе, П. В. Харламов, В. М. Приходько, Е. А. Болгова, В. Е. Шведова. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости и вязкости микрополярного смазочного материала	5
К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова, Е. В. Любчинов. Математическая модель формообразования циклической и каналовой поверхностей на основе нелинейного вращения	14
Л. А. Сладкова, В. В. Фокин. Изменение напряженно-деформированного состояния элементов опорно-поворотного устройства кранов при эксплуатации	22
В. Ю. Юрков. Интервальные множества в инженерной геометрии	29
А. Х. Шамутдинов, И. Ю. Лесняк. Теоретическое исследование кинематических пар «тор с тором» на основе геометрической кинематики	35
Р. Н. Пигилова, Ф. М. Филиппова, Ю. А. Аверьянова. Снижение травматизма при внедрении автоматизированных систем управления производственных процессов на энергетических предприятиях	44
А. С. Балдина. Построение систем управления затратами по обеспечению качества на российских оборонных предприятиях	52
К. А. Бражникова, Д. Е. Ильц. Методические рекомендации оценки качества процесса управления научно-техническим проектом на этапе научных исследований на базе вуза	58

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М. Я. Клецель, Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко. Повышение пропускной способности электрических сетей на основе интеграции метеорологических данных	67
В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. С. Соколов. Математическая модель электротехнического комплекса с накопителем электрической энергии для испытания асинхронных двигателей	76
С. С. Гиршин, В. А. Деев, Е. В. Петрова, О. В. Кропотин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов. Уточненный анализ предельных режимов воздушных линий электропередачи	83
О. В. Косарева-Володько, Алилу Сани Маман Кабиру. Проектирование и моделирование фотоэлектрических систем с помощью программного обеспечения PVsystem	91
О. А. Лысенко. Наблюдатель расхода жидкости асинхронного электропривода центробежного насоса	100

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

И. В. Богачков. Анализ характеристик рассеяния Манделъштама – Бриллюэна в разнородностях эрбиевых оптических волокон	108
А. В. Волков, А. М. Добренко, Н. А. Дробницкий, А. А. Дружинин, Д. В. Мылкин, М. О. Шейкин. Измерение и оптимизация индуктивных элементов в системах управления комбинированными энергокомплексами на основе возобновляемых источников энергии	117
Е. А. Абидова. Алгоритм обработки данных в задаче управления состоянием оборудования	125
А. И. Чередов, А. В. Щелканов. Преобразователь ток-частота на основе осциллирующего эффекта	134
С. М. Кулясов, Д. М. Четтер, А. Н. Ляшук. Теоретическая оценка стабильности частоты сигнала цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов	139
А. М. Samandari. Promising systems for controlling prosthetics: a review	150

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

M. A. Mukutadze, P. V. Kharlamov, V. M. Prikhodko, E. A. Bolgova, V. E. Shvedova. Evaluation of the wear resistance of the modified radial bearing design considering the compressibility and viscosity of the micropolar lubricant	5
K. L. Panchuk, T. M. Myasoedova, E. V. Lyubchinov. Mathematical model of the formation of cyclic and channel surfaces based on nonlinear rotation	14
L. A. Sladkova, V. V. Fokin. Modification of changes in the stress-strain state of crane slewing gear elements while operational conditions	22
V. Yu. Yurkov. Interval sets in applied geometry	29
A. Kh. Shamutdinov, I. Yu. Lesnyak. Theoretical study of kinematic pairs «torus with torus» based on geometric kinematics	35
R. N. Pigilova, F. M. Filippova, Yu. A. Averyanova. Reduction of injury rate when introducing automated control systems of production processes at energy enterprises	44
A. S. Baldina. Building cost management systems for quality assurance at Russian defense enterprises	52
K. A. Brazhnikova, D. E. Ilts. Methodological recommendations for assessing the quality of science and technology project management process at the scientific research stage on the basis of higher education institution	58

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

M. Ya. Kletsel, E. V. Petrova, S. S. Girshin, V. A. Krivolapov, V. N. Goryunov, V. M. Trotsenko. Increasing the capacity of electric grids based on the integration of meteorological data	67
V. V. Kharlamov, D. I. Popov, P. S. Sokolov. Mathematical model of an electrical complex with the device of electrical energy storage for testing induction motors	76
S. S. Girshin, V. A. Deev, E. V. Petrova, O. V. Kropotin, V. A. Krivolapov, V. N. Goryunov. Refined analysis of the limit modes of overhead power lines	83
O. V. Kosareva-Volodko, Alilu Sani Maman Kabiru. Design and simulation of photovoltaic systems using PVsystem software	91
O. A. Lysenko. Fluid flow observer for an asynchronous electric drive of a centrifugal pump	100

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

I. V. Bogachkov. Analysis of characteristics of Mandelstam–Brillouin scattering in varieties of erbium optical fibers	108
A. V. Volkov, A. M. Dobrenko, N. A. Drobnitskiy, A. A. Druzhinin, D. V. Mylkin, M. O. Sheykin. Measurement and optimization of inductive elements in control systems of combined heat and power supply based on renewable energy sources	117
E. A. Abidova. Decision support algorithm to prevent hardware failures	125
A. I. Cheredov, A. V. Shchelkanov. Current-to-frequency converter based on oscillistor effect	134
S. M. Kulyasov, D. M. Chetter, A. N. Lyashuk. Theoretical assessment of the stability of a digital thermocompensated quartz oscillator with temperature sensor based on two auxiliary quartz oscillators	139
Самандари Али Мирдан. Перспективные системы для управления протезами: обзор	150

УДК 621.822.17
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-5-13
EDN: NZPADZ

М. А. МУКУТАДЗЕ
П. В. ХАРЛАМОВ
В. М. ПРИХОДЬКО
Е. А. БОЛГОВА
В. Е. ШВЕДОВА

Ростовский государственный
университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону

ОЦЕНКА ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ И ВЯЗКОСТИ МИКРОПОЛЯРНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Данное исследование включает разработку и анализ математической модели течения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре модифицированной конструкции бесконечного радиального подшипника скольжения с учетом сжимаемости и влияния давления на реологические свойства смазочного материала.

Рассматривая сжимаемость смазочного материала, авторы учитывали зависимость вязкости и плотности смазочного вещества от высокого давления. В условиях, типичных для радиальных подшипников, значительные нагрузки могут вызывать изменения в свойствах смазочного материала, что, в свою очередь, влияет на его способность к формированию устойчивой смазывающей пленки. Поэтому введение параметров сжимаемости в модель позволяет более точно предсказать поведение смазочного вещества и эффективность смазки в различных режимах работы.

Новая модель разработана общеизвестными уравнениями течения микрополярного смазочного вещества, уравнением неразрывности и уравнением состояния.

Проведен сравнительный анализ численного результата теоретических моделей и экспериментального исследования. Таким образом, данная работа может представлять весомый вклад в область исследования радиальных подшипников. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций подшипников, позволяющего увеличить их надежность и долговечность.

Ключевые слова: модифицированная конструкция радиального подшипника, оценка износостойкости, антифрикционное полимерное покрытие, ламинарный режим течения, микрополярный смазочный материал, гидродинамический режим течения.

Введение. Для повышения надежности опор скольжения необходимо глубокое понимание структурных и динамических нагрузок, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. Технологические достижения в области химии и материаловедения позволили создать новые виды смазок, которые существенно уменьшают трение и износ. Это достигается путем введения в полимеры различных наполнителей, включая твердые смазки, такие как графит, дисульфид молибдена или углеродные нанотрубки. Такие композиты обладают значительно улучшенной износостойкостью и могут противостоять сложным воздействиям, характерным для промышленных трибосистем.

Применение жидких смазок расширяет диапазон скоростей, при которых материал может эффективно работать, поскольку это позволяет переходить от граничного трения к жидкостному трению в условиях гидродинамики. В момент запуска или остановки будут действовать защитные покрытия, а в период стационарной работы — самосмазочный материал.

Современные разработки в области полимерных покрытий сосредоточены на модификации базовых материалов с целью совершенствования их трибологических характеристик. Исследования показывают, что такие покрытия способны работать в условиях без смазки, что значительно упрощает эксплуатацию механизмов и снижает эксплуатационные затраты.

Хотя фторопласт (ПТФЭ) известен своими замечательными антифрикционными свойствами и способностью функционировать в узлах трения без дополнительного смазывания, значительного повышения его износостойкости можно достичь при использовании дополнительных смазочных материалов.

На этапе проектирования критически важно учитывать взаимодействие различных материалов и покрытий, анализировать их поведение под воздействием высоких температур и скоростей. Чтобы достичь максимальной эффективности, требуется учитывать влияние внешних факторов, таких как температура, давление и сжимаемость в комплексе.

Как известно, сжимаемость жидкости отрицательно влияет на энергетику и динамику, обуславливает уменьшение подачи и объемного КПД, ухудшает быстродействие гидродвигателя узлов трения, а также неустойчивого движения при большой массе.

Поэтому гидродинамический расчет подшипников скольжения без учета сжимаемости считается некорректным, что придает этому параметру первостепенное значение.

Полимерное покрытие с канавкой на поверхности подшипника выполняет несколько ключевых функций. Во-первых, канавка способствует более равномерному распределению смазочного вещества по поверхности подшипника, что минимизирует риск образования сухого трения. Во-вторых, наличие канавки способствует более эффективному отводу тепла, что предотвращает перегрев рабочей зоны и уменьшает износ подшипника.

Проведенные трибологические испытания втулок с нанесенными антифрикционными полимерными покрытиями [1–4] демонстрируют значительное снижение коэффициента трения по сравнению с обычными стальными втулками. Это подтверждает целесообразность их применения в узлах, подвергающихся интенсивным эксплуатационным на-

грузкам. Применение композитов, содержащих высокопрочные волокна и армирующие элементы, позволило значительно улучшить механическую прочность и теплопроводность изделий, что важно для предотвращения перегрева и преждевременного выхода узлов из строя.

На этапе проектирования очень важно учитывать взаимодействие различных материалов и покрытий [5–9], проанализировать их поведение под воздействием высоких нагрузок, скоростей и температур.

Для успешного применения полимеров [10–13] в трибосопряжениях технологических машин необходимо учитывать специфические особенности каждой трибосистемы. Игнорирование этих особенностей может привести к снижению эффективности подходов, разработанных в исследованиях.

Экспериментальные данные [14–20] свидетельствуют о том, что переменные величины, такие как концентрация наполнителя и температура отверждения, оказывают значительное влияние на характер акустической эмиссии и, как следствие, на эксплуатационные характеристики конечного материала. Авторы отмечают, что дальнейшие исследования в этом направлении могут расширить возможности использования полимерных композитов, предоставив более универсальные решения для различных отраслей промышленности.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что внедрение антифрикционных полимерных композиционных покрытий открывает новые перспективы в повышении надежности и эффективности промышленного оборудования.

Гидродинамический расчет подшипников скольжения без учета сжимаемости смазочного материала является принципиально некорректным. Исследование сжимаемости смазочного материала для трибозулов машин и механизмов представляет собой важный и актуальный аспект указанных расчетов.

Анализ работ, посвященных экспериментальному исследованию сжимаемости жидкостей в интервале температур и давления различными приемами, показывает, что предложенный новый метод способен дать надежные параметры в широком диапазоне давления и температур. А также сопоставление данных о внутреннем давлении жидкости, полученных разными способами, приводит к выводу о наличии довольно большого количества ошибок в их определении. В связи с этим исследование способов повышения эксплуатационных характеристик подшипников скольжения является актуальным и востребованным.

Целью исследования является уточнение ранее полученных результатов [21] с учетом сжимаемости смазочного материала.

Постановка задачи. Течение сжимаемого микрополярного смазочного материала происходит в рабочем зазоре модифицированной конструкции радиального подшипника.

В принятом расположении полярной системы координат (рис. 1) уравнения контура вала, подшипниковой втулки под покрытием и полимерного покрытия, копирующего опорный профиль втулки, запишем в виде:

$$r' = r_0(1 + H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 - \tilde{h}. \quad (1)$$

Вязкостные характеристики, зависящие от давления, отражены в выражении

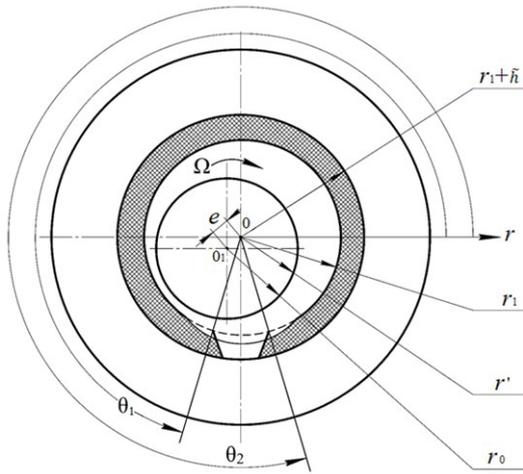


Рис. 1. Схема трибоконтакта

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha p'} \quad (2)$$

Разработка математической модели. Для оценки износостойкости модифицированной конструкции подшипника использованы с учетом (2) уравнение течения сжимаемого микрополярного смазочного материала для случая «тонкого слоя», уравнение неразрывности [21] и уравнение состояния с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} (2\mu' + \kappa') \left(\frac{\partial^2 v_{\theta_i}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'} \right) &= \frac{1}{r'} \frac{dp'_i}{d\theta} - \kappa' \frac{\partial v_{r'_i}}{\partial r'}, \\ \gamma' \left(\frac{\partial^2 v'_i}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v'_i}{\partial r'} \right) &= \kappa' v'_i + \kappa' \frac{\partial v_{\theta_i}}{\partial r'}, \\ \frac{\partial(\rho' v'_{r'_i})}{\partial r'} + \frac{(\rho' v'_{r'_i})}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial(\rho' v_{\theta_i})}{\partial \theta} &= 0, \\ p' &= \frac{\lambda \Omega^2 r'^2}{2} \rho'. \end{aligned} \quad (3)$$

$v_{\theta} = 0, \quad v_{r'} = 0$ при $r' = r_1$ — скорость течения смазочного материала на поверхности подшипниковой втулки;

$v_{\theta} = v'(\theta), \quad v_{r'} = u'(\theta)$ при $r' = r_1 - \tilde{h}$ — скорость течения смазочного материала на поверхности полимерного покрытия подшипниковой втулки;

$v_{\theta} = r_0 \Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta$ при $r' = r_0 + e \cos \theta$ — скорость течения смазочного материала на поверхности вала;

$$p'(0) = p'(\theta) = p_g. \quad (4)$$

Для удобства расчета применим переход к безразмерным величинам:

$$r' = r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \quad r' = (r_1 - \tilde{h}) - \delta r,$$

$$\delta = (r_1 - \tilde{h}) - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i, \quad v_{r'_i} = \Omega \delta u_i,$$

$$p' = p \cdot p, \quad p' = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega r_0^2}{2\delta^2},$$

$$v' = v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma,$$

$$\rho' = \frac{2p_g}{\lambda \Omega^2 r_0^2}, \quad \rho' = \rho \cdot \rho,$$

$$N^2 = \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}, \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}. \quad (5)$$

В результате произведенных преобразований (5), опираясь на уравнения (3) и (4), мы получили выражения:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} = \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta},$$

$$\frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} - \frac{v_i}{N_1} - \frac{1}{N_1} \cdot \frac{du_i}{dr} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho.$$

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \text{ при } r = h(\theta);$$

$$v = 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \text{ при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2;$$

$$v = v(\theta), \quad u = u(\theta), \quad v = 0 \text{ при } r = \eta_2,$$

$$0 \leq \theta \leq \theta_1, \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi;$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p};$$

$$Q = \text{const}, \quad p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1). \quad (6)$$

Для сжимаемого смазочного материала пренебрегаем $\frac{1}{N_1} \ll 1$, а также учтем малость зазора, тогда уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = \frac{1}{\Lambda} \cdot e^{-\alpha p} \frac{dp_i}{d\theta},$$

$$v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0, \quad p = \rho. \quad (7)$$

Введем обозначения $z = e^{-\alpha p}$, и в результате ряда преобразований система уравнений (7) примет вид

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2h} (2r - h) = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_i}{d\theta},$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial r} = 0,$$

$$p = \rho, \quad v_i = \frac{1}{2h} (r^2 - rh) \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями

$$v = 1, \quad u = -\eta \sin \theta \text{ при } r = h(\theta),$$

$$v = v'(0), \quad u = u'(0) \text{ при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi,$$

$$v = 0; \quad u = 0 \text{ при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$z(0) = z(\theta_1) = z(\theta_2) = z(2\pi) = e^{-\frac{\alpha p_g}{p}} \quad (9)$$

Автомодельное решение (8) ищем по известному методу [22]:

$$\begin{aligned} \rho v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta), \\ \psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}_i(\xi_i), \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i), \\ U_i(r, \theta) &= -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta), \\ \xi_i &= \frac{r_i}{h(\theta)} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \quad \text{и} \quad \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi, \\ \xi_i &= \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2. \\ u_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) &= 0, \\ \frac{dz_i}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right), \quad i = 1, 3, \\ \frac{dz_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Интегрируя (10), для поля скоростей и гидродинамического давления имеем аналитические выражения:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_1'(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1}{2} (\xi_1 - 1), \quad \tilde{u}_1(\xi_1) = \\ &= b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_1^3}{3} - \frac{\xi_1^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_1}{2} + 1 \right) \xi_1, \\ \tilde{\psi}_2'(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1), \quad \tilde{u}_2(\xi_2) = \\ &= b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1, \\ \tilde{\psi}_3'(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1), \quad \tilde{u}_3(\xi_3) = \\ &= b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1, \\ p_1 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6\Lambda}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - \frac{2\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \right) \times \\ &\times \left(\theta + 3\eta \sin \theta \right) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right), \\ p_2 &= \frac{p_g}{p^*} + 6\Lambda(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right), \\ p_3 &= \frac{p_g}{p^*} + \frac{6\Lambda(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \frac{1}{p} \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Интегрируя (11) методом последовательных приближений, получим:

$$\begin{aligned} p_{11} &= 1, \quad p_{21} = 1, \quad p_{31} = 1. \\ p_{12} &= \frac{6\Lambda}{(1 - \eta_2)^2} \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2} \right) \times \\ &\times \left(\theta + 3\eta \sin \theta \right) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right), \\ p_{22} &= 6\Lambda(\theta - \theta_1) \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) - \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{2\eta}{\theta - \theta_1} (\sin \theta - \sin \theta_1) \right), \\ p_{32} &= \frac{6\Lambda(\theta - \theta_2)}{(1 - \eta_2)^2} \left(1 + \alpha \frac{p_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_g}{p^*} \right)^2 \right) \times \\ &\times \left[1 + \frac{2\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) - \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) \right] \times \\ &\times \left(1 + \frac{3\tilde{\eta}}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для определения несущей способности и силы трения используем формулу (12):

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{6\mu_0 r_0^3 \Omega}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} p_{12} \cos \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_{22} \cos \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_{32} \cos \theta d\theta \right], \\ R_y &= \frac{6\mu_0 \omega_0^3}{2\delta^2} \left[\int_0^{\theta_1} p_{12} \sin \theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} p_{22} \sin \theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} p_{32} \sin \theta d\theta \right], \\ L_{TP} &= \mu \left(1 + \alpha p - \frac{\alpha^2}{2} p^2 \right) \left[\int_0^{\theta_1} \frac{1}{p} \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(0)}{h^2(0)} + \frac{\tilde{v}_1'(0)}{h(0)} \right) d\theta + \right. \\ &+ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{p} \left(\frac{\tilde{\psi}_2''(0)}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{\tilde{v}_2'(0)}{(h(\theta) + \tilde{h})^3} \right) d\theta + \\ &\left. + \int_{\theta_2}^{2\pi} \frac{1}{p} \left(\frac{\tilde{\psi}_3''(0)}{h(\theta)} + \frac{\tilde{v}_3'(0)}{h(\theta)} \right) d\theta \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Проведенные проверки подтвердили надежность предложенной теоретической модели в указанных диапазонах параметров.

В частности, значения параметра сжимаемости $\Lambda = 0, 1 - 0,9$, напряжения σ в диапазоне 4–20 МПа были тщательно протестированы, чтобы убедиться в точности и применимости модели в широком диапазоне сценариев (табл. 1).

Экспериментальная часть. Экспериментальное исследование состоит из: верификации разработанной расчетной модели радиального подшипника скольжения с оптимальным сечением маслоподдерживающей канавки и определение величины погрешности; комплекс экспериментального исследования подшипника с новой разработанной конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки. Это несущая поверхность с антифрикционным полимерным композиционным покрытием, имеющим маслоподдерживающую ка-

Результаты теоретического исследования

№	σ , МПа	Параметр сжимаемости А				
		0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
		Коэффициент трения				
1	4	0,0095	0,0130	0,0091	0,0078	0,0052
2	8	0,0073	0,0074	0,0075	0,0058	0,0044
3	12	0,0050	0,0042	0,0041	0,00207	0,00204
4	16	0,0039	0,0041	0,0040	0,00201	0,00202
5	20	0,00208	0,0040	0,0039	0,00205	0,00201

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов исследования

№ п/п	Режим		Теоретический результат		Экспериментальное исследование	Погрешность теоретического (с учетом сжимаемости) экспериментального исследования
	σ , МПа	V, м/с	без учета сжимаемости	с учетом сжимаемости		
1	4	0,3	0,0170	0,0152	0,0153	0,6–2,5 %
2	8	0,3	0,0215	0,0098	0,0097	
3	12	0,3	0,0095	0,0076	0,0078	
4	16	0,3	0,0210	0,0086	0,0087	
5	20	0,3	0,0219	0,0150	0,0151	

навку, а также профиль, контур которого адаптирован к конкретным условиям трения.

В процессе этих исследований установлена область их рационального применения. Исследуемые антифрикционные покрытия представляют собой гибридный композиционный материал, состоящий из трех типов полимеров различной физической природы. Это тканый каркас из фторопластовых нитей «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81) и полиимидных нитей «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80), пропитанный матричным связующим на основе фенольной смолы, модифицированной термостойким каучуком.

Триботехнические экспериментальные исследования радиальных подшипников скольжения проводились на модернизированной машине трения модели ИИ5018 на образцах в виде частичных вкладышей. Колодки вырезались из кольцевой заготовки по центральному углу, равному 60 градусов. На их рабочие поверхности наносились полимерные композиционные покрытия и канавки вдоль оси трибосопряжения на глубину покрытия. Кроме того, колодки имеют отверстия для термопар.

Эксперименты проводились при различных режимах работы (табл. 2), включая изменения скорости вращения, нагрузки и температурные условия, позволяющие значительно уменьшить износ и улучшить тепловыделение, что способствует повышению надежности и уменьшению простоев в работе механизмов.

Проведенные испытания с использованием как традиционных методов измерения трения и износа, так и современных инструментальных методов позволили получить высокоточные измерения, что, в свою очередь, помогло более глубоко понять механизмы трения и износа в новой конструкции.

Результаты исследования. Теоретическое исследование позволило получить более точные данные,

что имеет большое значение для их эффективного применения в различных инженерных системах. Уточнены несущая способность на 5–7 %, а коэффициент трения — на 6–8 %. В дальнейших исследованиях представляется целесообразным изучение дополнительных факторов, таких как температурные условия, динамические нагрузки и взаимодействие с различными смазочными материалами, позволяющее продолжать совершенствовать конструкции таких подшипников и расширять области их применения.

Данные эксперимента показали наличие колебаний коэффициента трения, которое связано с динамическими изменениями в условиях контакта поверхностей и воздействиями внешних параметров. Такое поведение коэффициента трения при увеличении нагрузки указывает на сложность взаимодействий в системе, особенно с учетом того, что максимальная нагрузка достигала 20 МПа, что эквивалентно ступенчатому увеличению нагрузки в 5 раз.

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность разработанных теоретических моделей.

Выводы

1. Проведенное исследование привело к значительному расширению возможностей практического использования расчетных моделей радиального подшипника скольжения и позволяет на практике оценивать его критически важные эксплуатационные характеристики.

2. Исследование радиальных подшипников скольжения, принимающих в учет сжимаемость, показало значительное улучшение их эксплуатационных характеристик. Результаты исследований демонстрируют, что несущая способность таких подшипников уточняется на 5–7 %, а коэффициент

трения — на 6–8 %. Этот прогресс не только выявляет важные конструкционные аспекты, но и открывает новые перспективы для применения таких подшипников в различных инженерных сферах.

Обсуждение и заключение. С учетом ранее установленных параметров канавок была разработана расчетная модель, детально описывающая поведение подшипника в гидродинамическом режиме. Особое внимание уделено сжимаемости истинно вязкого смазочного материала, параметры вязкости которого зависят от давления и условий трения.

Итогом проведенного исследования стала возможность устанавливать основные эксплуатационные характеристики подшипника на этапе проектирования, что существенно повышает его надежность и долговечность, что является важным шагом в развитии технологий подшипников и смазочных материалов, предоставляя инженерам эффективные инструменты для оптимизации их работы.

Условные обозначения: r_0 — радиус вала с полимерным покрытием, м; r_1 — радиус подшипниковой втулки, м; e — эксцентриситет; ε — относительный эксцентриситет; h — высота канавки, м; μ' — коэффициент динамической вязкости смазочного материала, Нм/с²; κ' , γ' — коэффициенты вязкости микрополярного смазочного материала, Нм/с²; μ_0 — характерная вязкость неньютоновского смазочного материала, Нм/с²; α' — экспериментальная постоянная величина; p' — гидродинамическое давление в смазочном слое, Па; κ_0 , γ_0 — характерная вязкость микрополярного смазочного материала, Нм/с²; v_{θ_1} , v_{r_1} — компоненты вектора скорости смазочной среды, м/с; Λ — параметр сжимаемости;

$\eta = \frac{l}{\delta}$ — конструктивный параметр; $\eta_2 = \frac{\tilde{h}}{\delta}$ — конструктивный параметр, характеризующий канавку; θ_1 , θ_2 — соответственно угловые координаты канавки; $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ — известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки; Q — расход смазочного материала в единицу времени.

Библиографический список

1. Isaacs N. S. Liquid phase high pressure chemistry. New York, Chichester Brisbane, Toronto: Wiley-Interscience, 1981. 414 p.
2. le Noble W. H. Organic high pressure chemistry. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1988. 489 p.
3. Marcus Y., Hefter G. T. The compressibility of liquids at ambient temperature and pressure // Journal of Molecular Liquids. 1997. No. 73–74. P. 61–74. DOI: 10.1016/S0167-7322(97)00057-3.
4. Kiselev V. D., Kashaeva E. A., Konovalov A. I. Pressure effect on the rate and equilibrium constant of the Diels-Alder reaction 9-chloroanthracene with tetracyanoethylene // Tetrahedron. 1999. Vol. 55. P. 1153–1162.
5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017, Rhodes Island, June 12–14. 2017. P. 433–440. EDN: XXXKOLJ.
6. Polyakov R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia. 2020. Vol. 30 (3). P. 61–67. DOI: 10.21595/vp.2020.21379.
7. Kornaeva E. P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154. EDN: UARRFL.
8. Shutin D. V., Polyakov R. N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098.
9. Поляков Р. Н., Савин Л. А., Внуков А. В. Математическая модель бесконтактного пальчикового уплотнения с активным управлением зазором // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 1 (327). С. 66–71. EDN: XXRSCT.
10. Негматов С. С., Абад Н. С., Саидахмедов Р. Х. [и др.]. Исследование вязкоупругих и адгезионно-прочностных свойств и разработка эффективных вибропоглощающих композиционных полимерных материалов и покрытий машиностроительного назначения // Пластические массы. 2020. № 7–8. С. 32–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36. EDN: MEIYAF.
11. Сайфуллаева Г. И., Негматов С. С., Абад Н. С., Камалова Д. И. Исследование электропроводящих композиционных терморезистивных полимерных материалов и покрытий на их основе для триботехнического назначения // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2020. № 12 (81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (дата обращения: 20.06.2024).
12. Ерофеев В. Т., Смирнов И. В., Воронов П. В. [и др.]. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-5. С. 911–924. EDN: XSDHNB. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (дата обращения: 20.06.2024).
13. Икромов Н. А., Расулов Д. Н. Объекты и методики исследования композиционных полимерных материалов // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 10. EDN: ТМУНПК. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (дата обращения: 20.06.2024).
14. Zinoviev V. E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900 (1). P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009. EDN: TLACUN.
15. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 4. Higher l-alkanols (C11, C12, C14, C16), secondary, tertiary, and branched alkanols, cycloalkanoles, alkanediols, alkanetriols, ether alkanols, and aromatic hydroxy derivatives // Journal of Chemical & Engineering Data. 1997. Vol. 42. P. 415–433. DOI: 10.1021/JE960389Z.
16. Cibulka I., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 5. Aromatic hydrocarbons // Journal of Chemical & Engineering Data. 1999. Vol. 44. P. 411–429. DOI: 10.1021/je960199o.
17. Cibulka I., Zikova M. Liquid densities at elevated pressures of l-alkanols from C1 to C10: a critical evaluation of experimental data // Journal of Chemical & Engineering Data. 1994. Vol. 39 (4). P. 876–886. DOI: 10.1021/je00016a055.
18. Cibulka I., Hnedkovsky L. Liquid densities at elevated pressures of n-alkanes from C5 to C16: a critical evaluation of experimental data // Journal of Chemical & Engineering Data. 1996. Vol. 41. P. 657–668. DOI: 10.1021/je960058m.
19. Shapovalov V. V., Kolesnikov V. I., Kharlamov P. V. [et al.]. Improving the efficiency of the path — rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 900 (1). P. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011. EDN: KJDDLF.
20. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 3. Ethers, ketones, aldehydes, carboxylic acids, and esters // Journal of Chemical & Engineering Data. 1997. Vol. 42. P. 2–26. DOI: 10.1021/je960199o.
21. Кирищива В. И., Мукутадзе М. А. Исследование износостойкости радиального подшипника с полимерным покрытием, работающего на микрополярном смазочном материале // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45. EDN: DXLWGM.

22. Мукутадзе М. А., Абдулрахман Х. Н., Шведова В. Е. [и др.]. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14. EDN: IKFMSX.

МУКУТАДЗЕ Мурман Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения» (РГУПС), г. Ростов-на-Дону.
SPIN-код: 9636-3223
AuthorID (РИНЦ): 389305
ORCID: 0000-0003-2910-3047
AuthorID (SCOPUS): 55049709500
ResearcherID: AAI-2420-2021

Адрес для переписки: murman1963@yandex.ru

ХАРЛАМОВ Павел Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Транспортные машины и триботехника» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0001-5100-4894
AuthorID (SCOPUS): 57191516687

Адрес для переписки: pvharlamov@rgups.ru

ПРИХОДЬКО Виктор Маркович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий ка-

федрой «Начертательная геометрия и графика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-0907-9320

Адрес для переписки: v.m.prikhodko@yandex.ru

БОЛГОВА Екатерина Александровна, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-0737-1846

Адрес для переписки: bolgova_katya@mail.ru

ШВЕДОВА Валентина Евгеньевна, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-8469-7671

Адрес для переписки: shvedovavalya@yandex.ru

Для цитирования

Мукутадзе М. А., Харламов П. В., Приходько В. М., Болгова Е. А., Шведова В. Е. Оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника с учетом сжимаемости и вязкости микрополярного смазочного материала // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 5–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-5-13.

Статья поступила в редакцию 25.06.2024 г.

© М. А. Мукутадзе, П. В. Харламов, В. М. Приходько,
Е. А. Болгова, В. Е. Шведова

EVALUATION OF THE WEAR RESISTANCE OF THE MODIFIED RADIAL BEARING DESIGN CONSIDERING THE COMPRESSIBILITY AND VISCOSITY OF THE MICROPOLAR LUBRICANT

The research includes the development and analysis of a mathematical model of the micropolar lubricant flow in the working gap of a modified design of an infinite radial sliding bearing, taking into account compressibility and the effect of pressure on the rheological properties of the lubricant. Considering the lubricant compressibility, the authors took into account the dependence of the viscosity and density of the lubricant on high pressure. Under typical conditions of radial bearings, significant loads can cause changes in the properties of the lubricant, which affects its ability to form a stable lubricating film. Therefore, the introduction of compressibility parameters into the model allows more accurately predicting the behavior of the lubricant and the effectiveness of lubrication in various operating modes. The new model has been developed by the well-known equations of the flow of a micropolar lubricant, the continuity and the state equation. A comparative analysis of the numerical result of theoretical models and experimental research is carried out. Thus, the research represents a significant contribution to the field of radial bearings sphere. The obtained results can be used for further improvement of bearing designs, which allows increasing their reliability and durability of mechanical engineering.

Keywords: modified radial bearing design, wear resistance assessment, antifriction polymer coating, laminar flow mode, micropolar lubricant, hydrodynamic flow mode.

References

1. Isaacs N. S. Liquid phase high pressure chemistry. New York, Chichester Brisbane, Toronto: Wiley-Interscience, 1981. 414 p. (In Engl.).
2. le Noble W. H. Organic high pressure chemistry. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1988. 489 p. (In Engl.).
3. Marcus Y., Hefter G. T. The compressibility of liquids at ambient temperature and pressure // Journal of Molecular Liquids. 1997. No. 73–74. P. 61–74. DOI: 10.1016/S0167-7322(97)00057-3. (In Engl.).
4. Kiselev V. D., Kashaeva E. A., Konovalov A. I. Pressure effect on the rate and equilibrium constant of the Diels-Alder reaction 9-chloroanthracene with tetracyanoethylene // Tetrahedron. 1999. Vol. 55. P. 1153–1162. (In Engl.).
5. Polyakov R., Savin L. The method of long-life calculation for a friction couple «rotor-hybrid bearing» // Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems 2017, Rhodes Island, June 12–14. 2017. P. 433–440. EDN: XXKOLJ. (In Engl.).
6. Polyakov R. Predictive analysis of rotor machines fluid-film bearings operability // Vibroengineering Procedia. 2020. Vol. 30 (3). P. 61–67. DOI: 10.21595/vp.2020.21379. (In Engl.).
7. Kornaeva E. P. Application of artificial neural networks to diagnostics of fluid-film bearing lubrication // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. P. 012154. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012154. EDN: UARRFL. (In Engl.).
8. Shutin D. V., Polyakov R. N. Active hybrid bearings as mean for improving stability and diagnostics of heavy rotors of power generating machinery // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 032098. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032098. (In Engl.).
9. Polyakov R. N., Savin L. A., Vnukov A. V. Matematicheskaya model' beskontaktnogo pal'chikovogo uplotneniya s aktivnym upravleniyem zazorom [Mathematical model of the inflammatory pullic seal with active management of the clearance] //

Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2018. No. 1 (327). P. 66–71. EDN: XXRSCT. (In Russ.).

10. Negmatov S. S., Abed N. S., Saidakhmedov R. Kh. [et al.]. Issledovaniye vyazkoprugikh i adgezionno-prochnostnykh svoystv i razrabotka effektivnykh vibropogloshchayushchikh kompozitsionnykh polimernykh materialov i pokrytiy mashinostroitel'nogo naznacheniya [Research of viscoelastic and adhesion-strength property and development of effective vibration absorbing composite polymeric materials and coatings of mechanical engineering purpose] // *Plasticheskiye massy. Plasticheskie Massy*. 2020. No. 7–8. P. 32–36. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-7-8-32-36. EDN: MEIYAF. (In Russ.).

11. Sayfullayeva G. I., Negmatov S. S., Abed N. S., Kamalova D. I. Issledovaniye elektroprovodyashchikh kompozitsionnykh termoreaktivnykh polimernykh materialov i pokrytiy na ikh osnove dlya tribotekhnicheskogo naznacheniya [Research of electrically conductive composite thermoreactive polymer materials and coatings on their basis for tribotechnical purpose] // *Universum: tekhnicheskiye nauki: elektron. nauch. zhurn. Univerzum: Technical sciences. Electronic Scientific Journal*. 2020. No. 12 (81). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11102> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).

12. Yerofeyev V. T., Smirnov I. V., Voronov P. V. [et al.]. Issledovaniye stoykosti polimernykh pokrytiy v usloviyakh vozdeystviya klimaticheskikh faktorov chernomorskogo poberezh'ya [The study of stability of polymeric coatings in terms of exposing climatic factors of the black sea coast] // *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2016. No. 11–5. P. 911–924. EDN: XSDHHB. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41277> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).

13. Ikromov N. A., Rasulov D. N. Ob'yekty i metodiki issledovaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov [Objects and methods of research of composite polymer materials] // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. Modern Scientific Researches and Innovations*. 2020. No. 10 (114). EDN: TMYHPK. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/10/93640> (accessed: 20.06.2024). (In Russ.).

14. Zinoviev V. E. Analysis of factor affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 900 (1). P. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012009. EDN: TLACUN. (In Engl.).

15. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 4. Higher 1-alkanols (C11, C12, C14, C16), secondary, tertiary, and branched alkanols, cycloalkanoles, alkanediols, alkanetriols, ether alkanols, and aromatic hydroxy derivatives // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1997. Vol. 42. P. 415–433. DOI: 10.1021/JE960389Z. (In Engl.).

16. Cibulka I., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 5. Aromatic hydrocarbons // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1999. Vol. 44. P. 411–429. DOI: 10.1021/je960199o. (In Engl.).

17. Cibulka I., Zikova M. Liquid densities at elevated pressures of 1-alkanols from C1 to C10: a critical evaluation of experimental data // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1994. Vol. 39 (4). P. 876–886. DOI: 10.1021/je00016a055. (In Engl.).

18. Cibulka I., Hnedkovsky L. Liquid densities at elevated pressures of n-alkanes from C5 to C16: a critical evaluation of experimental data // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1996. Vol. 41. P. 657–668. DOI: 10.1021/je960058m. (In Engl.).

19. Shapovalov V. V., Kolesnikov V. I., Kharlamov P. V. [et al.]. Improving the efficiency of the path — rolling stock system based on the implementation of anisotropic frictional bonds // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 900 (1). P. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/900/1/012011. EDN: KJDDLf. (In Engl.).

20. Cibulka I., Hnedkovsky L., Takagi T. P- ρ -T data of liquids: summarization and evaluation. 3. Ethers, ketones, aldehydes, carboxylic acids, and esters // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 1997. Vol. 42. P. 2–26. DOI: 10.1021/je960199o. (In Engl.).

21. Kirishchiyeva V. I., Mukutadze M. A. Issledovaniye iznosostoykosti radial'nogo podshipnika s polimernym pokrytiyem, rabotayushchego na mikropolyarnom smazochnom materiale [Investigation of wear resistance of polymer-coated radial bearing running on micropolar lubricant] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 4 (184). P. 41–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-41-45. EDN: DXLWGM. (In Russ.).

22. Mukutadze M. A., Abdulrahman Kh. N., Shvedova V. E. [et al.]. Issledovaniya na iznosostoykost' konstruktssii radial'nogo podshipnika s uchetom reologicheskikh svoystv mikropolyarnogo smazochnogo materiala [Studies on wear resistance of the radial bearing design taking into account rheological properties of micropolar lubricant] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14. EDN: IKFMSX. (In Russ.).

MUKUTADZE Murman Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don.

SPIN-code: 9636-3223

AuthorID (RSCI): 389305

ORCID: 0000-0003-2910-3047

AuthorID (SCOPUS): 55049709500

ResearcherID: AAI-2420-2021

Correspondence address: murman1963@yandex.ru

KHARLAMOV Pavel Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Transport Vehicles and Tribotechnics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0001-5100-4894

AuthorID (SCOPUS): 57191516687

Correspondence address: pvharamov@rgups.ru

PRIKHODKO Viktor Markovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Descriptive Geometry and Graphics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-0907-9320

Correspondence address: v.m.prikhodko@yandex.ru

BOLGOVA Ekaterina Alexandrovna, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-0737-1846

Correspondence address: bolgova_katya6@mail.ru

SHVEDOVA Valentina Evgenievna, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-8469-7671

Correspondence address: shvedovavalya@yandex.ru

For citations

Mukutadze M. A., Kharlamov P. V., Prikhodko V. M., Bolgova E. A., Shvedova V. E. Evaluation of the wear resistance of the modified radial bearing design considering the compressibility and viscosity of the micropolar lubricant // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 5–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-5-13.

Received June 25, 2024.

© M. A. Mukutadze, P. V. Kharlamov, V. M. Prikhodko, E. A. Bolgova, V. E. Shvedova

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ И КАНАЛОВОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВРАЩЕНИЯ

Настоящая статья является продолжением цикла работ авторов по вопросам формообразования поверхностей нелинейного вращения. Геометрическая схема формообразования поверхностей этого класса включает в себя: ось нелинейного вращения, представляющую собой гладкую, в общем случае пространственную кривую, и образующую линию, также гладкую пространственную кривую. При вращении образующей линии относительно криволинейной оси каждая точка образующей описывает окружностную траекторию в соответствующей нормальной плоскости оси вращения. В результате формируется поверхность нелинейного вращения, представляющая собой нормальную циклическую поверхность. В настоящей работе, с целью развития ранее полученных авторами результатов исследования в области формообразования поверхностей нелинейного вращения, рассмотрено решение обратной задачи формообразования и дано математическое обоснование возможности формообразования каналовой поверхности на основе решений прямой и обратной задач. В работе приведены числовые примеры формообразования рассматриваемых поверхностей, сопровождаемые математическими моделями поверхностей, их компьютерной реализацией. Результаты исследований могут быть полезными при разработке САПР, предусматривающих проектирование поверхностных форм изделий на основе циклических и каналовых поверхностей в машиностроении, строительстве, архитектуре и других практических областях.

Ключевые слова: нелинейное вращение, математическая модель, гладкость функции, формообразование, циклическая поверхность, обратная задача, каналовая поверхность.

Введение. В предыдущих работах авторов [1, 2] были рассмотрены вопросы теории формообразования нормальных циклических поверхностей на основе нелинейного вращения. Последнее может быть рассмотрено как обобщение линейного вращения, известного в геометрии и кинематике и характеризующегося наличием в пространстве прямолинейной оси вращения с окружностными траекториями точек пространства, формируемыми в пучке плоскостей, перпендикулярных оси вращения. Прямая линия пространства в линейном вращении остается прямой линией, а расстояние и угол являются инвариантными параметрами этого вращения. В случае же нелинейного вращения осью вращения служит гладкая кривая линия, при этом окружностные траектории точек пространства распределяются по нормальным плоскостям криволинейной оси и образуют нелинейный пучок плоскостей, а центры вращений точек пространства — это точки пересечения криволинейной оси и ее нормальных плоскостей. Прямая линия в нелинейном

вращении теряет свою прямолинейность, а расстояние и угол не являются инвариантными параметрами этого вращения.

Авторам известно несколько работ, посвященных вопросам теории и практических приложений нелинейного вращения. В работах [3, 4] выполнено построение обобщенных поверхностей вращения на основе введения функции взаимосвязи геометрий линии центров вращения и линии радиусов. В качестве траектории вращательного движения точек пространства используется кривая второго порядка, представленная в виде кусочной рациональной кривой Безье. Авторами указанных работ оставлены нерассмотренными вопросы влияния геометрии и взаимного расположения указанных линий на геометрию формируемой обобщенной поверхности вращения. В работах [5, 6] введено понятие «квазивращение», как обобщение понятия «вращение». При этом в качестве оси вращения использованы кривые второго порядка. Результаты исследований были успешно приложены авторами

указанных работ к формообразованию алгебраических кривых и поверхностей высоких порядков и выполнено практическое применение исследований в параметрической архитектуре.

В настоящей работе для решения новых задач формообразования поверхностей нелинейного вращения (ПНВ) используется предложенная авторами ранее [1, 2] геометрическая схема формообразования этих поверхностей, базовыми элементами которой служат: криволинейная ось вращения и криволинейная образующая линия. В работе рассмотрены решения следующих задач формообразования:

1. Обратная задача, в которой требуется по заданной криволинейной оси вращения и заданному следу образующей линии ПНВ в нормальной плоскости этой оси, определить саму ПНВ.

2. Определение каналовой поверхности (КП) на основе геометрической схемы формообразования ПНВ.

Решение первой задачи позволяет раскрыть нюансы и особенности формообразования ПНВ, представляющей собой, по существу, нормальную циклическую поверхность (НЦП). Решение же второй задачи демонстрирует единство математических моделей формообразования НЦП и КП и универсальность предлагаемой геометрической схемы формообразования этих поверхностей, что позволяет утверждать существование единого подхода к формообразованию двух разнотипных классов поверхностей.

Следует отметить обширное множество отечественных и зарубежных публикаций по вопросам геометрии формообразования КП [7–11]. Очевидно, теоретический интерес к этим поверхностям обусловлен, прежде всего, их разноплановой практической востребованностью:

1) в качестве сглаживающих поверхностей сложных поверхностных конструкций [12, 13];

2) в задачах телесной трассировки при проектировании авиационной техники [14–16];

3) в компьютерной графике (компьютерные игры и анимация) [17];

4) в CAD (Computer Aided Geometric Design) [7, 12, 13, 18] и др. областях науки, техники и промышленности.

Математические модели поверхностей, образуемых на основе нелинейного вращения. Рассмотрим решения двух задач формообразования поверхностей, отмеченных во введении. В основу этих решений положены теоретические закономерности вращения геометрических объектов относительно пространственной криволинейной оси, рассмотренные в работах [1, 2].

1. Решение обратной задачи формообразования ПНВ. Постановка задачи: определить ПНВ по заданной ее пространственной криволинейной оси вращения и заданному следу образующей линии искомой поверхности в нормальной плоскости оси.

Уравнение оси вращения в неподвижной декартовой системе координат $Oxuz$ имеет вид:

$$q: \bar{Q}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\};$$

$$t \in [t_0, t_n] \subset \mathbf{R}; \bar{Q}'(t) = \frac{d\bar{Q}}{dt} \neq 0.$$

Уравнение следа g_g образующей линии искомой ПНВ в локальной системе координат подвижного трехгранника (τ, ν, β) оси q следующее:

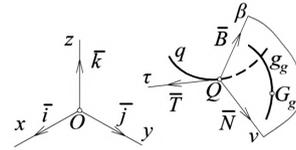


Рис. 1. Исходные данные для решения обратной задачи формообразования ПНВ

$$g_g: \bar{r}_g(\mu) = \{\tau = 0, \nu_g(\mu), \beta_g(\mu)\};$$

$$\mu \in [\mu_0, \mu_n] \subset \mathbf{R}; \bar{r}_g'(\mu) = \frac{d\bar{r}_g}{d\mu} \neq 0.$$

В работе [2] был рассмотрен алгоритм формообразования ПНВ по заданным базовым элементам геометрической схемы формообразования — оси вращения $Q(t)$ и образующей линии $G(l)$, совершающей вращение относительно оси. Было отмечено, что в процессе формообразования ПНВ в текущей нормальной плоскости (ν, β) оси $\bar{Q}(t)$ образуется некоторая линия g_g , представляющая собой след образующей линии $G(l)$ в процессе ее вращения. Образование этого следа при заданной образующей $G(l)$ назовем прямой задачей формообразования. Обратной будет задача определения образующей линии и самой ПНВ по заданной оси $\bar{Q}(t)$ и заданному следу $g_g \subset (\nu, \beta)$ (рис. 1).

Выполняя переход от подвижной декартовой системы координат $Q\tau\nu\beta$ к неподвижной $Oxuz$, получим следующее уравнение:

$$\bar{G}(t, \mu) = A^{-1}(t) \cdot \bar{r}_g(\mu) + \bar{Q}(t), \quad (1)$$

где приняты обозначения: $A^{-1}(t)$ — матрица перехода от подвижной декартовой системы координат к неподвижной:

$$A^{-1}(t) = \begin{bmatrix} x_T & x_N & x_B \\ y_T & y_N & y_B \\ z_T & z_N & z_B \end{bmatrix},$$

$$\bar{T}(t) = \{x_T, y_T, z_T\} = \frac{\bar{Q}(t)}{|\bar{Q}'(t)|},$$

$$\bar{Q}'(t) = \{x'(t), y'(t), z'(t)\}$$

$$\bar{B}(t) = \{x_B, y_B, z_B\} = \frac{\bar{Q}'(t) \times \bar{Q}''(t)}{|\bar{Q}'(t) \times \bar{Q}''(t)|},$$

$$\bar{Q}''(t) = \frac{d^2\bar{Q}(t)}{dt^2},$$

$$\bar{N}(t) = \{x_N, y_N, z_N\} = \bar{B} \cdot \bar{T}.$$

Чтобы уравнение (1) описывало в неподвижном пространстве образ \bar{G}_g линии \bar{r}_g , принадлежащей нормальной плоскости (ν, β) , необходима функциональная связь параметров μ и t . Эта связь не обеспечивается исходными условиями рассматриваемой задачи. Поэтому введем некоторую функцию $f(t)$, устанавливающую гомеоморфное соответствие числовых отрезков $[\mu_0, \mu_n]$ и $[t'_0, t'_n] \subset [t_0, t_n]$. При этом на функцию $f(t)$ должно быть наложено условие $f'(t) = \frac{df}{dt} \neq 0$, обеспечивающее ее гладкость.

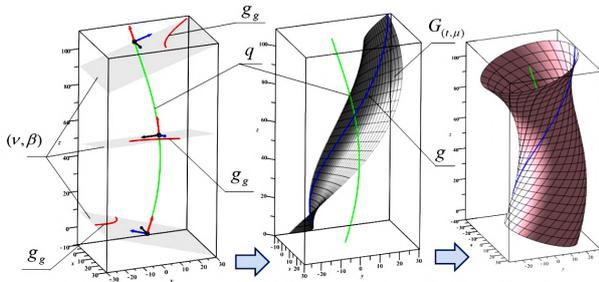


Рис. 2. Исходные данные и результаты вычислений: образующая линия g и ПНВ на её основе

С введением такой функции уравнение (1) принимает вид:

$$\bar{G}_g(t) = A^{-1}(t) \cdot \bar{r}_g(f(t)) + \bar{Q}(t). \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает в системе координат $Oxuz$ пространственную кривую g — образ следа g_g , принадлежащего нормальной плоскости (v, β) линии q . Очевидно, рассматриваемая обратная задача имеет не единственное решение. Очевидно также, что линия (2) служит образующей линией для формообразования ПНВ. Рассмотрим пример.

Пример 1. Криволинейная ось вращения q и след g_g заданы соответственно уравнениями: $\bar{Q}(t) = \{10 \cos(\pi \cdot t), 10 \sin(\pi \cdot t), 100t\}$, $t \in [0, 1]$ в неподвижной системе координат $Oxuz$ и $\bar{r}_g(\mu) = \{\tau = 0, v = -20\mu + 20, \beta = 20\mu^2 + 10\}$, $\mu \in [0, 1]$ в подвижной локальной системе координат $Q\tau v\beta$. Требуется построить ПНВ.

Решение. Исходные данные позволяют получить на основании выражения (1) уравнение поверхности $\bar{G}(t, \mu)$:

$$\bar{G}(t, \mu) = \begin{bmatrix} S_x \cdot \sin(\mu \cdot \pi) + S_y \cdot \cos(\mu \cdot \pi) \\ -S_x \cdot \cos(\mu \cdot \pi) + S_y \cdot \sin(\mu \cdot \pi) \\ \frac{10(\pi(2t^2 + 1) + 10\mu k)}{k} \end{bmatrix},$$

где $k = \sqrt{\pi^2 + 100}$, $S_x = \frac{100(2t^2 + 1)}{k}$, $S_y = 10(2t - 1)$, $\mu \in [0, 1]$, $t \in [0, 1]$.

Зададим некоторую функцию $\mu = f(t)$ так, чтобы выполнялось условие $f'(t) \neq 0$, например, $\mu = t^2$. По уравнению (2) определим пространственную кривую g — образ следа g_g (рис. 2)

$$g: \bar{G}_g(t) = \begin{bmatrix} D_x \cdot \sin(t \cdot \pi) + D_y \cdot \cos(t \cdot \pi) \\ -D_x \cdot \cos(t \cdot \pi) + D_y \cdot \sin(t \cdot \pi) \\ \frac{10(\pi(2t^2 + 1) + 10tk)}{k} \end{bmatrix},$$

где $k = \sqrt{\pi^2 + 100}$, $D_x = \frac{100(2t^4 + 1)}{k}$, $D_y = 10(2t^2 - 1)$, $t \in [0, 1]$.

Последующее формообразование ПНВ основано на вращении кривой линии g относительно криволинейной оси q и выполняется на основе алгоритма, приведенного в работе [1]. При помощи приведенных в работе [2] уравнений определяются координатно-параметрические уравнения ПНВ:

$$\bar{W}(t, \lambda) = (x(t, \lambda), y(t, \lambda), z(t, \lambda)),$$

$$t \in [0, 1], \lambda \in [0, 1].$$

Развернутая форма этих уравнений ввиду их большой громоздкости в работе не приводится. Визуализация результатов вычислений по полученным уравнениям приведена на рис. 2.

2. Формообразование каналовой поверхности.

В нелинейном вращении точка пространства описывает круговую траекторию, принадлежащую нормальной плоскости (v, β) криволинейной оси вращения q , при этом центр траектории есть точка оси вращения, через которую проходит нормальная плоскость. Из этих условий следует уравнение

$$\bar{Q}'(t) \cdot (\bar{G}(l) - \bar{Q}(t)) = 0, \quad (3)$$

где $\bar{G}(l)$ — векторное уравнение образующей, описывающей в нелинейном вращении ПНВ, каждая точка которой описывает соответствующую круговую траекторию. Из уравнения (3) следует зависимость $l = f(t)$, при этом, как показано в работе [2], выполняется условие $f'(t) = \frac{df}{dt} \neq 0$, обеспечивающее гладкость этой функции в каждой точке числового отрезка $[t_0, t_n]$.

Как известно, каналовой называется поверхность, огибающая однопараметрическое множество сфер. Это определение каналовой поверхности было дано в 1805 г. французским геометром, основателем начертательной геометрии Г. Монжем (1746 — 1818).

Сформируем сферу радиуса $R(t)$ в неподвижной системе координат:

$$\bar{R}(t) = \bar{G}_r(t) - \bar{Q}(t), \quad \bar{G}_r(t) = \bar{G}_r(f(t)), \quad R(t) = |\bar{R}(t)|. \quad (4)$$

Пусть \bar{G} — радиус-вектор произвольной точки этой сферы. Запишем однопараметрическое семейство сфер $\Phi(t): (\bar{G} - \bar{Q}(t))^2 - R(t)^2 = 0$. Сформируем огибающую однопараметрического семейства сфер:

$$\begin{aligned} \Phi(t): & (\bar{G} - \bar{Q}(t))^2 - R(t)^2 = 0, \\ \Phi'(t): & (\bar{G} - \bar{Q}(t)) \cdot \bar{Q}'(t) + R(t) \cdot R'(t) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) определяет характеристическую окружность $c(t)$ как линию пересечения плоскости $\Phi'(t)$ и текущей сферы семейства $\Phi(t)$. Следуя методике [7], дадим геометрическую интерпретацию системе (5). Для этого введем обозначение $\bar{G} - \bar{Q}(t) = \bar{U}(t)$. Тогда, учитывая второе уравнение системы (5), запишем: $\bar{U}(t) \cdot \bar{U}'(t) = |\bar{U}(t)| \cdot |\bar{U}'(t)| \cdot \cos \alpha$. В таком случае систему уравнений (5) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi(t): & \bar{U}(t)^2 - R(t)^2 = 0, \\ \Phi'(t): & |\bar{U}(t)| \cdot |\bar{U}'(t)| \cdot \cos \alpha - R(t) \cdot R'(t) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Определим характеристическую окружность $c(t)$ (рис. 3). Из вышеизложенного следует, что $R(t) = |\bar{G} - \bar{Q}(t)| = |\bar{U}(t)|$. В таком случае из второго уравнения системы (6) следует, что $|\bar{U}'(t)| \cdot R(t) \cdot \cos \alpha = R(t) \cdot R'(t)$. Введя обозначение $R(t) \cdot \cos \alpha = \rho(t)$, из предыдущего равенства получаем:

$$\rho(t) = \pm \frac{R(t) \cdot R'(t)}{|\bar{U}'(t)|} = \pm \frac{R(t) \cdot R'(t)}{\sqrt{\bar{Q}'(t)^2}}. \quad (7)$$

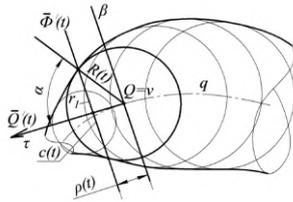


Рис. 3. К интерпретации огибающей однопараметрического семейства сфер

$\rho(t)$ определяет расстояние от центра Q локальной системы координат $Q\tau\beta$ до плоскости $\Phi'(t)$, содержащей характеристическую окружность $c(t)$. Уравнение (6) позволяет определить радиус характеристической окружности:

$$r_1(t) = R(t) \cdot \sqrt{\frac{\overline{Q}'(t)^2 - R'(t)^2}{\overline{Q}'(t)^2}}. \quad (8)$$

Очевидно, выражение $\overline{Q}'(t)^2 - R'(t)^2 \geq 0$ определяет необходимое и достаточное условие формообразования действительной каналовой поверхности, рассматриваемой как непрерывное однопараметрическое множество характеристических окружностей $\{c(t)\}$ действительного радиуса $r_1(t) \geq 0$.

Рассмотрим получение векторно-параметрического уравнения каналовой поверхности. Параметрические уравнения характеристической окружности $c(t)$ в локальной декартовой системе координат $Q\tau\beta$ для $t = t_Q$ будут иметь следующий вид:

$$\tau_c(t = t_Q) = \pm \rho(t = t_Q) = \pm \frac{R(t_Q) \cdot R'(t_Q)}{\sqrt{\overline{Q}'(t_Q)^2}},$$

$$v_c(t = t_Q) = r_1(t_Q) \cdot \cos(\lambda \cdot 2\pi),$$

$$\beta_c(t = t_Q) = r_1(t_Q) \cdot \sin(\lambda \cdot 2\pi),$$

где $t = t_Q \in [t_0, t_n]$, $\lambda \in [0, 1]$.

$$|\overline{R}(t)| = \frac{25\sqrt{734761 t^6 - 833120 t^5 + 1636966 t^4 + 1172000 t^3 + 996241 t^2 + 496000 t + 250000}}{127t + 250},$$

при этом введена функциональная зависимость параметров $l = f(t)$ [2]:

$$f(t) = \frac{\sqrt{5t(127t + 250)(41t^2 + 75)}}{127t + 250}.$$

Затем по уравнению (8) определяем радиус характеристической окружности:

$$r_1(t) = \frac{25A}{2(127t + 250)} \times \frac{1}{B \cdot A^2(127t + 250)^4} \left(\begin{aligned} & - 2176905836 \ 18365225 \cdot t^{12} + \\ & + 7645765462 \ 63204 \cdot Bt^{10} - 9153266151 \ 06983250 t^{11} + \\ & + 5153360952 \ 612320 \cdot Bt^9 - 2324386815 \ 44756975 t^{10} + \\ & + 1265363660 \ 3256824 \cdot Bt^8 - 2016356219 \ 13274750 t^9 + \\ & + 1536554825 \ 6904000 \cdot Bt^7 - 3235510212 \ 204132025 t^8 + \\ & + 1606686507 \ 1177924 \cdot Bt^6 + 4410363171 \ 957631250 t^7 + \\ & + 1824799404 \ 5468000 \cdot Bt^5 - 6335928337 \ 902343750 t^6 + \\ & + 8665303152 \ 500000 \cdot Bt^4 + 5644477210 \ 132968750 t^5 + \\ & + 3366558750 \ 000000 \cdot Bt^3 - 4183207343 \ 671875000 t^4 + \\ & + 5866640625 \ 000000 \cdot Bt^2 + 2413252382 \ 812500000 t^3 + \\ & + 1875000000 \ 00000 \cdot Bt - 1006987871 \ 337890625 t^2 + \\ & + 3906250000 \ 000000 \cdot B + 3287768554 \ 68750000 t - 5493164062 \ 5000000 \end{aligned} \right)^{\frac{1}{2}},$$

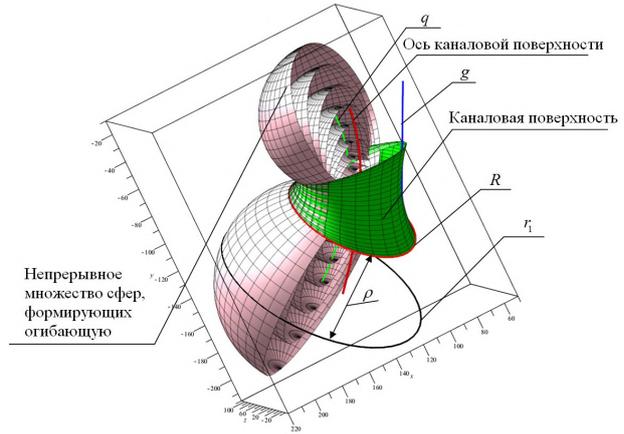


Рис. 4. Визуализация каналовой поверхности (пример 2, прямая задача)

В общем виде уравнение окружности $c(t = t_Q)$ в локальной системе координат $Q\tau\beta$ имеет вид: $\overline{R}_c(t = t_Q, \lambda) = \{\tau_c(t = t_Q), v_c(t = t_Q, \lambda), \beta_c(t = t_Q, \lambda)\}$. Уравнение каналовой поверхности в общем виде можно записать так:

$$\overline{G}(t, \lambda) = A^{-1}(t) \cdot \overline{R}_c(t, \lambda) + \overline{Q}(t), \quad (9)$$

где $A^{-1}(t)$ — матрица обратного перехода.

Пример 2 (прямая задача). Задана криволинейная ось вращения q уравнением $\overline{Q}(t) = \{50t^2 + 100, -100t - 60, 40t^2\}$, $t \in [0, 1]$. Образующая линия g задана уравнением $\overline{G}(l) = \{50l^2 + 50, -100l^2 - 60, l^2\}$, $l \in [0, 1]$. Требуется построить каналовую поверхность.

Решение. Уравнение каналовой поверхности определяется в соответствии с алгоритмом, приведенным выше. Вначале определим выражение для радиусов сфер в неподвижной системе координат по уравнению (4):

где приняты обозначения:

$$A = \sqrt{734761t^6 - 833120t^5 + 1636966t^4 - 1172000t^3 + 996241t^2 - 496000t + 250000}, \quad B = |41t^2 + 25|.$$

Используя общее выражение (9), определяем уравнение канальной поверхности, которое ввиду громоздкости не приводится. Визуализация результатов вычислений, выполненных по полученному уравнению, приведена на рис. 4.

Пример 3 (обратная задача).

Криволинейная ось вращения q и след g_g заданы соответственно уравнениями $\bar{Q}(t) = \{10 \cos(\pi \cdot t), 10 \sin(\pi \cdot t), 100t\}$, $t \in [0,1]$ в неподвижной системе координат $Oxuz$ и $\bar{r}_g(\mu) = \{\tau = 0, v = -20\mu + 20, \beta = 20\mu^2 + 10\}$, $\mu \in [0,1]$ в нормальной плоскости (v, β) . Требуется построить канальную поверхность.

$$r_1(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi^2 + 100}} \left(R(\mu) \left(\frac{1}{A\mu^2} (B\mu^6 - 32B\mu^4 + 16B\mu^3 - 16B\mu^2 + \pi^2 + 16B\mu - 4B + 100A\mu^2) \right) \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$A = 4\mu^4 + 8\mu^2 - 8\mu + 5, \quad B = (400\mu^4 + 800\mu^2 - 800\mu + 500)^2.$$

По общему выражению (9) определяем уравнение канальной поверхности. Её развёрнутое уравнение ввиду его громоздкости также не приводится. Визуализация результатов вычислений по полученному уравнению приведена на рис. 5.

Заключение. В результате исследования закономерностей образования поверхностей нелинейного вращения построена общая математическая модель известных в геометрии и ее практических приложениях двух классов поверхностей: нормальных циклических и канальных. В этой модели геометрическая схема формообразования канальной поверхности представляет собой наиболее общую схему, основанную на классическом определении этой поверхности. В случае нормальной циклической поверхности выполнено решение обратной задачи формообразования, которое в совокупности с решением для этой поверхности прямой задачи, изложенным в предыдущих работах авторов, создает теоретический базис формообразования поверхности класса нормальных циклических. Представленные числовые примеры формообразования поверхностей обоих классов подтверждают работоспособность и универсальность предложенной математической модели.

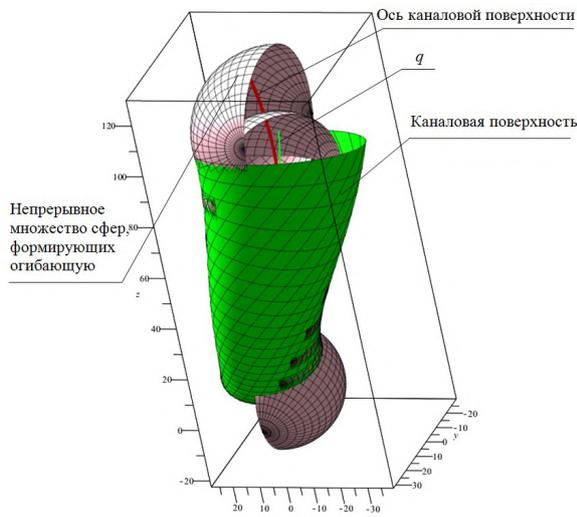


Рис. 5. Визуализация канальной поверхности (пример 3, обратная задача)

Решение. Уравнение канальной поверхности определяется также в соответствии с алгоритмом, приведенным выше. В обратной задаче построения поверхности ПВН задаётся функциональная зависимость $\mu = f(t)$. На основе выражения (4) получаем уравнение радиусов сфер в неподвижной системе координат

$$R(\mu) = 10\sqrt{4\mu^4 + 8\mu^2 - 8\mu + 5}.$$

По уравнению (8) определяем радиус характеристической окружности:

Математическая модель и соответствующие ей алгоритмы формообразования могут быть использованы при разработке специализированных САПР, предусматривающих разработку поверхностных конструкций на основе циклических и канальных поверхностей в различных областях науки, техники и промышленности.

Библиографический список

1. Панчук К. Л., Мясоедова Т. М., Любчинов Е. В. Циклические поверхности, сопровождающие нелинейчатые квадратики вращения // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-23-29. EDN: ВАКВРА.
2. Панчук К. Л., Мясоедова Т. М. Поверхность нелинейного вращения // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-5-12. EDN: VFPCSL.
3. Григорьев М. И. Построение обобщенных поверхностей вращения // Семинар «DNA&CAGD». Избранные доклады. 2007. С. 1–7.
4. Григорьев М. И., Малозёмов В. Н. Составные кривые и поверхности Безье. Аналитический подход. Lambert Academic Publishing, 2010. 132 с. ISBN 978-3-8433-0323-1.
5. Беглов И. А., Рустамян В. В. Метод вращения геометрических объектов вокруг криволинейной оси // Геометрия и графика. 2017. № 3. С. 45–50. DOI: 10.12737/article_59bfa4eb0bf488.99866490.
6. Beglov I. A. Computer geometric modeling of quasirotation surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 16–17. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057.
7. Peternell M., Pottmann H. Computing Rational Parametrizations of Canal Surfaces // Journal Symbolic Comput. 1997. Vol. 23, Issue 2-3. P. 255–266. DOI: 10.1006/jsc.1996.0087.
8. Xu Z., Feng R., Sun J. G. Analytic and Algebraic Properties of Canal Surfaces // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2006. Vol. 195, Issues 1-2. P. 220–228. DOI: 10.1016/j.cam.2005.08.002.
9. Öztürk G., Bulca B., Bayram B. K. [et al.]. On Canal Surfaces in E^3 // Selçuk Journal of Applied Mathematics. 2010. Vol. 11, № 2. P. 103–108.
10. Kim Y. H., Liu H., Qian J. Some characterizations of canal surfaces // Bull. Korean Math. Soc. 2016. Vol. 53 (2). P. 461–477. DOI: 10.4134/BKMS.2016.53.2.461.
11. Кривошапка С. Н., Иванов В. Н. Энциклопедия аналитических поверхностей (более 500 поверхностей, 38 классов: математикам, инженерам, архитекторам). Москва: URSS, 2010. 556 с. ISBN 978-5-397-00985-0.

12. Farouki R. A., Sverrisor R. Approximation of Rolling-ball Blends for Freeform Parametric Surfaces // *Computer-Aided Design*. 1996. Vol. 28 (11). P. 871–878. EDN: AKQVYD.

13. Hartman E. *Geometry and Algorithms for Computer Aided Design*. Department of Mathematics Darmstadt University of Technology. Darmstadt, Germany, 2003. 160 p.

14. Ньи Н. Х., Чжо Т., Маркин Л. В. Исследование алгоритмов использования рецепторных геометрических моделей в задачах телесной трассировки авиационной техники // *Труды МАИ*. 2013. № 69. С. 1–25. URL: www.mai.ru/upload/iblock/62a/62ad38934954abb6876b2d621d39098f.pdf (дата обращения: 12.03.2024).

15. Маркин Л. В. Геометрические модели автоматизированной компоновки летательных аппаратов // *Вестник МАИ*. 2015. Т. 22, № 1. С. 47–56. EDN: TNWXMФ.

16. Ньи Н. Х., Маркин Л. В., Соседко А. А. Применение рецепторных геометрических моделей в задачах автоматизированной компоновки авиационной техники // *Труды МАИ*. 2014. № 72. С. 1–26. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/f17/f178d8a078b6927a66bd134f8a37e7ad.pdf> (дата обращения: 12.03.2024).

17. Ma Y., Tu C., Wang W. Computing the Distance between Canal Surfaces // *Advances in Geometric Modeling and Processing*. GMP 2010. Lecture Notes in Computer Science. 2010. Vol. 6130 / Eds. B. Mourrain, S. Schaefer, G. Xu. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-13411-1_7.

18. Núñez-Valdés J., Ocaña Almagro I. Canal surfaces and its application to the CAGD // *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2021. Vol. 10, Issue 03. P. 19–31.

ПАНЧУК Константин Леонидович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5623-0008

AuthorID (РИНЦ): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Адрес для переписки: Panchuk_KL@mail.ru

МЯСОЕДОВА Татьяна Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6056-6455

AuthorID (РИНЦ): 686836

ORCID: 0000-0002-9641-9417

AuthorID (SCOPUS): 57201776004

ResearcherID: E-7505-2014

Адрес для переписки: mtm44mtm44@mail.ru

ЛЮБЧИНОВ Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8144-6370

AuthorID (РИНЦ): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

Адрес для переписки: Lubchinov.E.V@yandex.ru

Для цитирования

Панчук К. Л., Мясоедова Т. М., Любчинов Е. В. Математическая модель формообразования циклической и каналовой поверхностей на основе нелинейного вращения // *Омский научный вестник*. 2024. № 4 (192). С. 14–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-14-21.

Статья поступила в редакцию 11.06.2024 г.

© К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова, Е. В. Любчинов

MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION OF CYCLIC AND CHANNEL SURFACES BASED ON NONLINEAR ROTATION

This work is a continuation of the series of works by the authors devoted to the issues of shaping surfaces of nonlinear rotation. The geometric scheme for the formation of surfaces of this class includes: an axis of nonlinear rotation, which is a smooth, generally spatial curve, and a forming line, also a smooth spatial curve. When the generating line rotates relative to the curvilinear axis, each point of the generating line describes a circumferential trajectory in the corresponding normal plane of the rotation axis. As a result, a surface of nonlinear rotation is formed, which is a normal cyclic surface. In this work, in order to develop the research results previously obtained by the authors in the field of shaping surfaces of nonlinear rotation, the solution to the inverse problem of shaping is considered and a mathematical justification is given for the possibility of shaping a channel surface based on solutions to the direct and inverse problems. The work provides numerical examples of the formation of the surfaces under consideration, accompanied by mathematical models of surfaces, their computer implementation and visualization. The research results can be useful in the development of CAD systems that involve the design of surface forms of products based on cyclic and channel surfaces in mechanical engineering, construction, architecture and other practical fields.

Keywords: nonlinear rotation, mathematical model, smoothness of function, shaping, cyclic surface, inverse problem, channel surface.

References

1. Panchuk K. L., Myasoyedova T. M., Lyubchinov E. V. Tsiklicheskiye poverkhnosti, soprovozhdayushchiye nelineyachatyye kvadriki vrashcheniya [Cyclic surfaces accompanying non-ruled quadrics of rotation] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-23-29. EDN: BAKBPA. (In Russ.).
2. Panchuk K. L., Myasoyedova T. M. Poverkhnost' nelineynogo vrashcheniya [The surface of non-linear rotation] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-5-12. EDN: VFCPSL. (In Russ.).
3. Grigor'yev M. I. Postroyeniye obobshchennykh poverkhnostey vrashcheniya [Construction of generalised rotation surfaces] // Seminar «DNA&CAGD». *Izbrannyye doklady. Seminar «DNA&CAGD». Izbrannyye Doklady*. 2007. P. 1–7. (In Russ.).
4. Grigor'yev M. I., Malozemov V. N. Sostavnyye krivyye i poverkhnosti Bez'ye. Analiticheskiy podkhod [Compound curves and Bézier surfaces. Analytical approach]. Lambert Academic Publishing, 2010. 132 p. ISBN 978-3-8433-0323-1. (In Russ.).
5. Beglov I. A., Rustamyan V. V. Metod vrashcheniya geometricheskikh ob'yektov vokrug krivolinyeynoy osi [Method of rotation of geometrical objects around the curvilinear axis] // *Geometriya i grafika. Geometry and Graphics*. 2017. No. 3. P. 45–50. DOI: 10.12737/article_59bfa4eb0bf488.99866490. (In Russ.).
6. Beglov I. A. Computer geometric modeling of quasirotation surfaces // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1901. P. 16–17. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057. (In Engl.).
7. Peternell M., Pottmann H. Computing Rational Parametrizations of Canal Surfaces // *Journal Symbolic Comput.* 1997. Vol. 23, Issue 2–3. P. 255–266. DOI: 10.1006/jsco.1996.0087. (In Engl.).
8. Xu Z., Feng R., Sun J. G. Analytic and Algebraic Properties of Canal Surfaces // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2006. Vol. 195, Issues 1–2. P. 220–228. DOI: 10.1016/j.cam.2005.08.002. (In Engl.).
9. Öztürk G., Bulca B., Bayram B. K. [et al.]. On Canal Surfaces in E^3 // *Selçuk Journal of Applied Mathematics*. 2010. Vol. 11, no. 2. P. 103–108. (In Engl.).
10. Kim Y. H., Liu H., Qian J. Some characterizations of canal surfaces // *Bull. Korean Math. Soc.* 2016. Vol. 53 (2). P. 461–477. DOI: 10.4134/BKMS.2016.53.2.461. (In Engl.).
11. Krivoshapko S. N., Ivanov V. N. Entsiklopediya analiticheskikh poverkhnostey (boleye 500 poverkhnostey, 38 klassov: matematikam, inzheneram, arkhitektozam) [Encyclopaedia of Analytical Surfaces (over 500 surfaces, 38 classes: for mathematicians, engineers, architects)]. Moscow, 2010. 556 p. ISBN 978-5-397-00985-0. (In Russ.).
12. Farouki R. A., Sverrisor R. Approximation of Rolling-ball Blends for Freeform Parametric Surfaces // *Computer-Aided Design*. 1996. Vol. 28 (11). P. 871–878. EDN: AKQVYD. (In Engl.).
13. Hartman E. *Geometry and Algorithms for Computer Aided Design*. Department of Mathematics Darmstadt University of Technology. Darmstadt, Germany, 2003. 160 p. (In Engl.).
14. Nyi N. H., Kyaw H., Markin L. V. Issledovaniye algoritmov ispol'zovaniya retseptornykh geometricheskikh modeley v zadachakh telesnoy trassirovki aviatsionnoy tekhniki [The study

of algorithms using receptor geometric model in the problems of physical route tracing in aviation technology] // *Trudy MAI. Trudy MAI*. 2013. No. 69. P. 1–25. URL: www.mai.ru/upload/iblock/62a/62ad38934954abb6876b2d621d39098f.pdf (accessed: 12.03.2024). (In Russ.).

15. Markin L. V. Geometricheskiye modeli avtomatizirovannoy komponovki letatel'nykh apparatov [Geometric Models of Automated Layout Aircrafts] // *Vestnik MAI. Aerospace MAI Journal*. 2015. Vol. 22, no. 1. P. 47–56. EDN: TNWXMf. (In Russ.).

16. Nyi N. H., Markin L. V., Sosedko A. A. Primeneniye retseptornykh geometricheskikh modeley v zadachakh avtomatizirovannoy komponovki aviatsionnoy tekhniki [Implementation of receptor geometric models in the problems of automated layout design in aviation technology] // *Trudy MAI. Trudy MAI*. 2014. No. 72. P. 1–26. URL: <http://www.mai.ru/upload/iblock/f17/f178d8a078b6927a66bd134f8a37e7ad.pdf> (accessed: 12.03.2024). (In Russ.).

17. Ma Y., Tu C., Wang W. Computing the Distance between Canal Surfaces // *Advances in Geometric Modeling and Processing. GMP 2010. Lecture Notes in Computer Science*. 2010. Vol. 6130 / Eds. B. Mourrain, S. Schaefer, G. Xu. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-13411-1_7. (In Engl.).

18. Núñez-Valdés J., Ocaña Almagro I. Canal surfaces and its application to the CAGD // *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2021. Vol. 10, Issue 03. P. 19–31. (In Engl.).

PANCHUK Konstantin Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 5623-0008
AuthorID (RSCI): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Correspondence address: Panchuk_KL@mail.ru

MYASOEDOVA Tatyana Mikhailovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6056-6455

AuthorID (RSCI): 686836

ORCID: 0000-0002-9641-9417

AuthorID (SCOPUS): 57201776004

ResearcherID: E-7505-2014

Correspondence address: mtm44mtm44@mail.ru

LYUBCHINOV Evgeniy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8144-6370

AuthorID (RSCI): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

Correspondence address: Lubchinov.E.V@yandex.ru

For citations

Panchuk K. L., Myasoedova T. M., Lyubchinov E. V. Mathematical model of the formation of cyclic and channel surfaces based on nonlinear rotation // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 14–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-14-21.

Received June 11, 2024.

© K. L. Panchuk, T. M. Myasoedova, E. V. Lyubchinov

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА КРАНОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Несмотря на высокий технический уровень закупаемой за рубежом грузоподъемной техники, катастрофический отказ опорно-поворотных устройств этих кранов происходит через 3...5 лет срока службы вместо регламентированных 15. Наиболее характерными из них являются: повышенный износ кассет, выполненных из полиамида 6, сепараторов, зубьев шестерни и поворотного круга; выпадение тел качения (материал — подшипниковая сталь) из поворотного круга; выдавливание уплотнительной ленты. Для выявления скрытой причины преждевременного выхода из строя опорно-поворотного устройства кранов фирмы «Liebherr», работающих в средней полосе России, был выполнен натурный эксперимент при проведении погрузочно-разгрузочных работ, на основании проведения которого была установлена тенденция нагрева элементов опорно-поворотного устройства с учетом цикличности работы крана. Установлено, за 5 циклов нагружения тела качения прогреваются на глубину 40 мм до температуры порядка 40...45° С. Учитывая цикличность работы опорно-поворотного устройства крана и происходящее циклическое изменение температурного режима элементов опорно-поворотного устройства проведены теоретические исследования по изменению напряженно-деформированного состояния, например, контактирующих между собой кассет и тел качения изнашивания, работающих в условиях перепада температур. Установлено, что между торцевой поверхностью ролика и кассеты возникают напряжения, действующие в направлении плоскости касания и являющиеся причиной их повышенного изнашивания из-за возникающего внешнего трения.

Ключевые слова: стреловой самоходный кран, расчетные схемы, напряженно-деформированное состояние, опорно-поворотное устройство, отказы, прогрев, изнашивание, рабочий процесс.

Введение. В настоящее время на различных объектах России численность стреловых кранов зарубежного производства ведущих фирм-производителей Европы («Liebherr» и «Grove») и Японии («КАТО» и «Tadano») грузоподъемностью 50 т и выше составляет более 90 % [1]. Импортозамещение подразумевает не отказ от приобретенной ранее зарубежной техники, задействование числа единиц которой в настоящее время на различных объектах народного хозяйства составляет более 90 %. Эта цифра относится, например, к башенным и стреловым самоходным кранам, особенно высокой грузоподъемности. Сейчас отечественный рынок наводнился продукцией производителей из Китая (XCMG, SANY и др.).

Для импортозамещения необходимо сохранять работоспособность имеющейся в наличии техники, у которой произошли отказы, тем более что наложенные санкции со стороны недружественных стран не позволяют получать запасные узлы и детали от фирм-производителей.

Это говорит о том, что, «несмотря на высокий технический уровень закупаемой за рубежом грузоподъемной техники» [2], необходимо привлекать специалистов экспертных организаций для выявления причин отказов.

В частности, речь идет об отказах опорно-поворотных устройств (ОПУ) стреловых самоходных кранов грузоподъемностью свыше 50 т, срок службы которых по определению должен быть равен сроку службы машины в целом. Однако, как было указано в статье [3, 4], катастрофический отказ ОПУ происходит через 3...5 лет. Тем более что любой, даже незначительный, отказ этого элемента конструкции крана, равно как и любого другого вида техники, ведет к ремонтным работам, по трудоемкости сопоставимым с капитальными. Отказы опорно-поворотных устройств, присущие всем стреловым самоходным кранам и влияющие на срок службы, проанализированы в источниках научно-технической литературы [2, 4] многими авторами.



Рис. 1. Характерные отказы ОПУ: а — выпадение тел качения из кассет (сепараторов); б — выдавливание уплотнительной ленты

Таблица 1

Время, затрачиваемое на операции при проведении погрузочно-разгрузочных работ, с

Номер замера	t_1	t_2	t_3	t_4	Время цикла, с
	Угол поворота стрелы крана 45°				
1	16,48	20,67	16,52	18,11	71,78
2	10,56	15,80	16,02	16,37	58,75
3	11,06	16,24	17,47	16,07	60,84
Накопленные суммы	38,10	52,71	50,01	50,55	191,37
Среднее значение времени, с	12,7	17,57	16,67	16,85	63,79
Угол поворота стрелы крана 90°					
1	9,56	23,53	17,05	21,75	71,89
2	12,85	22,33	19,11	25,34	79,63
3	12,65	23,90	19,01	23,77	79,33
Накопленные суммы	35,06	69,76	55,17	70,86	233,63
Среднее значение времени, с	11,69	23,25	18,39	23,62	76,95

Ниже перечислим характерные отказы ОПУ, зафиксированные в процессе эксплуатации, касающиеся конкретно кранов производства «Liebherr» (рис. 1):

- изнашивание кассет (сепараторов);
- выпадение тел качения (рис. 1а, б);
- выдавливание уплотнительной ленты (рис. 1б);
- износ зубьев шестерни и поворотного круга.

Очевидно, что два первых отказа находятся во взаимосвязи.

Цель исследования. Выявить скрытые причины отказов элементов опорно-поворотного устройства.

Основная часть. Причины отказов экспертами, как правило, объясняются традиционными формулировками, связанными с нарушениями режимов эксплуатации техники.

Рассмотрим выявленные отказы и причины их появления исходя из циклического режима работы стрелового самоходного крана в процессе эксплуатации.

Известно, что при проведении погрузочно-разгрузочных работ его рабочий цикл составляет 1... 2 минуты (крепление груза — подъем на заданную высоту — перемещение в точку отгрузки — снятие груза — возвращение в исходное положение). Третья, четвертая и пятая операции сопряжены с по-

воротом стрелы крана в горизонтальной плоскости и имеют незначительный по продолжительности промежуток времени, в течение которого используется поворотный круг. За это время подшипники успевают нагреться до температуры порядка 40...45° С. Если работы проводятся в зимнее время года, то во время первой и второй операций подшипники успевают остыть, выделяя при этом конденсат, который накапливается в течение всей работы крана.

При этом глубина распространения теплового импульса в соответствии с исследованиями А. В. Чичинадзе [5] можно определить по формуле

$$b = 1,73\sqrt{at_i}. \quad (1)$$

Здесь a — температуропроводность материала; t_i — время выполнения i -й операции при погрузочно-разгрузочных работах, определяемая экспериментально, с.

Экспериментальные исследования для оценки длительности операций при погрузочно-разгрузочных работах проводились в реальных условиях эксплуатации на базе стрелового самоходного крана «Liebherr». Для упрощения представим цикл погрузочно-разгрузочных операций из четырех основных этапов.

1. Время крепление груза массой 8 т и подъем на заданную высоту — t_1 ;
2. Время поворота стрелы крана к месту разгрузки — t_2 ;
3. Время опускания груза и его снятия — t_3 ;
4. Время разворота крана в исходное положение — t_4 .

В рассматриваемом цикле время работы ОПУ осуществляется на втором и четвертом этапах.

В процессе эксперимента рассматривался процесс поворота стрелы на 45 и 90 градусов. Число параллельных опытов было равно трем.

Результаты проведения эксперимента представлены в табл. 1.

Время цикла при повороте на 45° составляет 1,063 мин., а при повороте на 90° — 1,283 мин.

Используя зависимость (1), оценим глубину распространения теплового импульса в кассете и ролике при исследуемых циклах работы стрелового самоходного крана. Очевидно, что во время операций поворота стрелы, глубина теплового импульса будет накапливаться, а во время крепления и съема груза — снижаться.

Оценку результатов эксперимента по интенсивности прогрева за n циклов будем проводить по предлагаемой ниже методике, представленной в виде алгоритма из условия, что температуропроводность α полиамида 6 равна $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а стали — $1,172 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [6]. Результаты расчетов на примере кассеты, выполненной из полиамида 6, приведены в табл. 2.

В начальный момент времени за время t_1 принимаем глубину прогрева равной нулю. Далее в процессе поворота крана за время t_2 глубина прогрева составила 2,783 мм. За время t_3 во время отсоединения груза элементы опорно-поворотного устройства остыли, в результате чего глубина прогрева уменьшилась на величину b_3 . Далее при возвращении в исходное состояние температура прогрева увеличится на величину b_4 , так как в работу включается ОПУ, и будет равна 2,7247 мм. При повторном цикле указанные значения b_i будут носить накопительный характер (табл. 2).

Графическая интерпретация полученных расчетов приведена на рис. 2. Здесь n — номер цикла.

Глубина прогрева представляет собой прямую линию.

Сводная таблица (табл. 3) по результатам всех исследований приведена ниже.

Анализ зависимостей, приведенных в табл. 3, свидетельствует о резком увеличении интенсивности прогрева в зависимости от незначительного увеличения (5...7 с) времени работы ОПУ (увеличение тангенса угла наклона к оси абсцисс). В случае прогрева кассет и подшипниковых сталеи интенсивность прогрева увеличивается в 3,63 раза.

Учитывая сказанное, предлагается следующая рабочая гипотеза, поясняющая преждевременный выход из строя ОПУ кранов фирмы «Liebherr», работающих в средней полосе России.

Отсутствие гаражного хранения кранов на объектах ведет к тому, что по окончании работ кран остается на открытом воздухе, где при действии отрицательной температуры конденсат, образовавшийся в процессе эксплуатации, замерзает, образуя пленку льда, располагающуюся между кассетой и телом качения и, возможно, между кассетами.

Рассмотрим случай расположения ледяной пластинки между торцевой поверхностью тела качения и кассеты (рис. 3б).

Таблица 2

Интенсивность прогрева полиамида 6 при угле поворота стрелы крана на 45° , мм

Номер цикла	Глубина прогрева в каждом цикле, мм			
	b_1	b_2	b_3	b_4
	2,3638	2,7830	2,7810	2,7227
1	0	2,783	0,002	2,7247
2	0,3609	3,1439	0,3629	3,0856
3	0,7218	3,5048	0,7238	3,4465
4	1,0827	3,8657	1,0847	3,8074
5	1,4436	4,2266	1,4456	4,1683

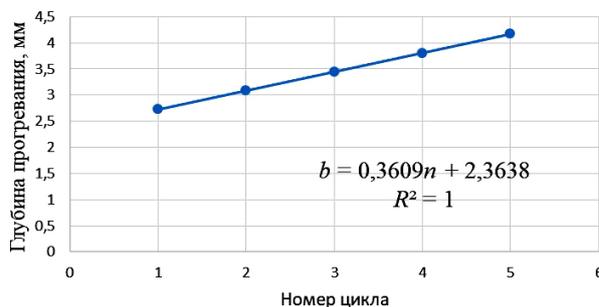


Рис. 2. Изменение глубины прогрева кассеты ОПУ за число циклов

Таблица 3

Интенсивность прогрева элементов ОПУ

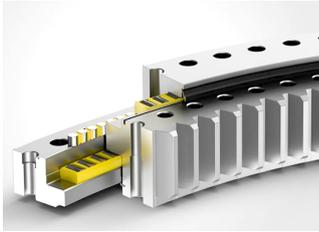
Угол поворота стрелы, град	Функция величины прогрева, мм
Кассета. Материал — полиамид 6	
45	$b = 0,3609n + 2,3638$
90	$b = 1,311n + 2,2680$
Ролик. Материал — подшипниковая сталь	
45	$b = 3,8483n + 21,1060$
90	$b = 11,6990n + 20,2470$

Расчетная схема ледяной пластинки и ее нагруженность представлены на рис. 4. Ледяная пластинка оказывается зажатой с двух сторон боковыми стенками кассеты. Тогда со стороны тела качения (по срединной плоскости) на нее будет действовать равномерно распределенная нагрузка интенсивностью q_1 (рис. 4а), вызывая изменение ее деформации, которая будет оказывать влияние на стенки кассеты, увеличивая их в размере, что является причиной выпадения роликов из кассеты.

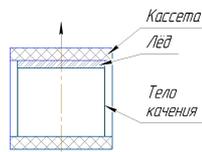
Ниже, пользуясь расчетами справочника [7, с. 53], определим основные характеристики нагруженности ледяной пластины:

— опорные реакции, Н

$$A = B = \frac{P}{2}$$



а)



б)

Рис. 3. Опорно-поворотное устройство:
а — элемент опорно-поворотного устройства; б — кассета

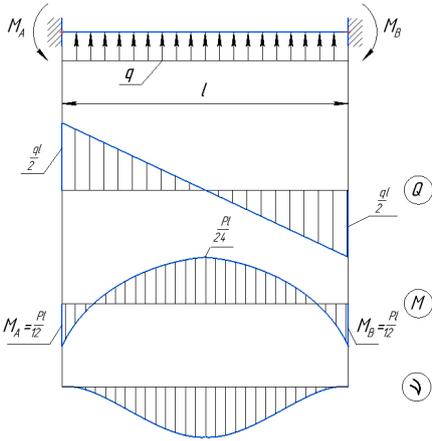


Рис. 4. Нагруженность пластины поперечными силами:
а — расчетная схема; б — эпюра поперечных сил;
в — эпюра изгибающих моментов; г — линия прогиба

— величины изгибающего момента в опорах, Н·м

$$M_A = M_B = \frac{Pl}{12};$$

— поперечная сила, Н

$$Q = \frac{P}{2} \left(1 - \frac{2x}{l} \right); \quad (2)$$

— изгибающий момент, Н·м

$$M = \frac{P}{2} \left(x - \frac{x^2}{l} - \frac{l}{6} \right); \quad (3)$$

— максимальная величина изгибающего момента в середине пролета (при $x = l/2$)

$$M_{\max} = \frac{Pl}{24}; \quad (4)$$

— величина изгибающего момента в точках А и В

$$-M_{\max} = \frac{Pl}{12}; \quad (5)$$

— уравнение линии прогиба

$$v = \frac{Px^2l}{24EJ} \left(\frac{x^2}{l^2} - 2\frac{x}{l} + 1 \right); \quad (6)$$

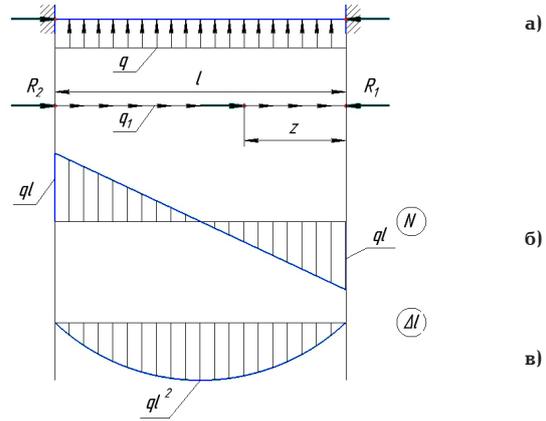


Рис. 5. Нагруженность пластины продольными силами:
а — расчетная схема; б — эпюра растяжения-сжатия;
в — эпюра перемещений

— величина максимального прогиба в середине пролета (при $x = l/2$)

$$f = \frac{Pl^2}{384EJ} \left(\frac{x^2}{l^2} - 2\frac{x}{l} + 1 \right). \quad (7)$$

Одновременно с силой, направленной перпендикулярно оси x , на пластинку будет действовать усилие растяжения-сжатия, возникающее в результате опоры о боковые стенки. Причиной этого усилия является деформация сжатия боковых стенок кассеты (рис. 5) и одновременного расширения пластинки льда. Усилие растяжения-сжатия интенсивностью q_2 считаем также равномерно распределенным вдоль оси x .

Ниже приведем основные характеристики нагруженности при сжатии пластины:

— величина усилий растяжения-сжатия в точках А и В

$$N_A = N_B = q_2 l^2; \quad (8)$$

— величина удлинения в середине

$$\Delta l = \frac{q_2 l^2}{EA}. \quad (9)$$

Здесь в формулах (1..8):

l — ширина кассеты, м;

E — модуль упругости льда, МПа;

J, A — осевой момент инерции (m^4) и площадь сечения (m^2) пластинки льда соответственно.

Учитывая температурную деформацию, произойдет удлинение пластины льда на величину Δl_t :

$$\Delta l_t = \alpha l \Delta t, \quad (10)$$

где α — коэффициент линейного расширения льда, $1/град\ C$;

l — ширина внутренней части кассеты (рис. 2б);

Δt — перепад температур, $^{\circ}C$.

При этом лед будет расширяться, а кассета сжиматься. Тогда суммарная деформация в пространстве между вертикальными стенками кассет от действия температуры будет равна

$$\Delta l_{\Sigma} = \Delta l_{\text{льда}} + \Delta l_{\text{кассеты}}. \quad (11)$$

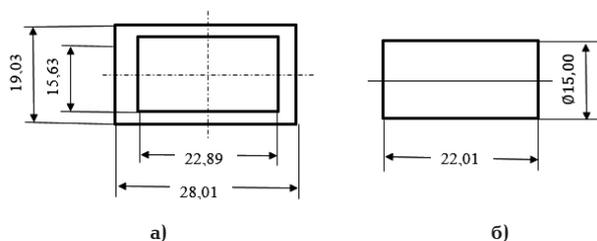


Рис. 6. Расчетные величины кассеты и ролика:
а — кассета; б — ролик

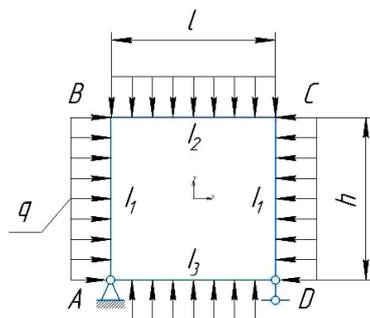


Рис. 7. Расчетная схема кассеты

Тогда с учетом сказанного максимальное напряжение при совместном действии усилий растяжения-сжатия, изгиба и температурной деформации равно [6]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \mp \frac{M_x}{W_x} \mp \frac{M_y}{W_y} + \frac{\Delta l_{\text{льда}} E_1}{l} + \frac{\Delta l_{\text{кассеты}} E_2}{l} \leq [\sigma], \quad (12)$$

где W_x и W_y — моменты сопротивления сечения относительно осей x и y , m^3 ;

A — площадь поперечного сечения ледовой пластинки, занимающей пространство между торцевой поверхностью ролика и горизонтальной стенкой кассеты, m^2 ;

E_1 и E_2 — модули упругости (модуль Юнга) льда и полиамида 6 соответственно;

l — расстояние между вертикальными стенками кассеты (ширина кассеты), m .

Расчетные величины кассеты и ролика приведены на рис. 6.

Кроме того, в процессе работы кассета зажата с четырех сторон соседними кассетами и опорной поверхностью направляющих поворотного круга. При этом она во время работы имеет незначительное перемещение. Поэтому расчетную схему кассеты рационально представить в виде шарнирно опертой замкнутой рамы, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой по контуру интенсивностью q (рис. 7).

При такой схеме нагружения величины изгибающих моментов в точках A, B, C, D будут одинаковы [8, с. 366]. При $J_2 = J_3$ величины изгибающего момента выражаются зависимостью (10):

$$M = M_A = M_B = M_C = M_D = -\frac{1+k}{1+k} \frac{h^2}{l^2} \cdot \frac{ql^2}{12}, \quad (13)$$

где k — коэффициент, зависящий от геометрических характеристик сечения элементов кассеты, рассматриваемой как рамная конструкция.

$$k = \frac{J_2 h}{J_1 l}; \quad p = \frac{J_2}{J_1};$$

$$n = 1 + p + 6k; \quad m = 2 + k + \frac{p}{k}(3 + 2k), \quad (14)$$

В соответствии с рис. 3 и рис. 5 очевидно, что между торцевой поверхностью ролика и кассеты возникают напряжения в направлении плоскости касания. В первом случае направленные вдоль оси y , а во втором — вдоль оси x . Учитывая, что направление вектора напряжений совпадает с направлением осей, лежащих в плоскости касания, то считаем, что между контактирующими поверхностями возникает внешнее трение [9], т.е. первая производная равна:

$$\frac{d\sigma_y}{dz} > 0 \quad \text{и} \quad \frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (15)$$

где z — координата, перпендикулярная плоскости касания.

Для снижения этого напряжения можно использовать эффект металлического мыла [6, 10, 11], представляющего собой состав моторного масла воды и боратсодержащих соединений ортоборатгексаметилентетрамина, позволяющего снизить коррозию и увеличить противоизносные свойства контактирующих поверхностей.

Закключение. На основании проведенных экспериментальных исследований была установлена скрытая причина отказов основных элементов опорно-поворотного устройства на примере стрелового самоходного крана фирмы «Liebherr» грузоподъемностью выше 50 т. Проведенная количественная оценка степени прогрева опорно-поворотного устройства крана в процессе его работы за время циклов позволила выявить линейный характер этого процесса независимо от материала элемента конструкции (рассматривались полиамид 6 и подшипниковая сталь). За 5 циклов нагружения тела качения прогреваются на глубину 40 мм до температуры порядка 40...45° С.

Перепад температур ведет к образованию конденсата, который при безгаражном хранении в условиях отрицательных температур образует пластинку льда, располагающуюся между кассетой и телом качения и зажаты с двух сторон боковыми стенками кассеты. Таким образом, на кассету с расположенным в ней телом качения действуют нагрузки от изгиба и растяжения, ведущие к увеличению ее напряженно-деформированного состояния и, соответственно к увеличению изнашивания кассет и тел качения, так как между торцевой поверхностью ролика и кассеты возникают напряжения в направлении плоскости касания. Учитывая, что направление вектора напряжений совпадает с направлением осей, лежащих в плоскости касания, то считаем, что между контактирующими поверхностями возникает внешнее трение, для снижения которого можно использовать эффект металлического мыла.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на основании выявленных отказов, характерных для кранов производства «Liebherr», позволили определить скрытую причину их появления, связанную с прогревом роликов и кассет ОПУ, а также разработать расчетные схемы с учетом изменения температурного фактора для решения новой задачи по оценке напряженно-

деформированного состояния узла «ролик-кассета», используя известные методы теорий прочности.

В данной статье рассмотрены только указанные выше причины, остальные будут учтены в следующих статьях.

Библиографический список

1. Бардышев О. А. Особенности сертификации зарубежных кранов и подъемников // Все краны. 2006. № 3. С. 31–34.
2. Бардышев О. А., Стоцкая Л. В. IV Уральский конгресс подъемно-транспортного оборудования // Механизация строительства. 2011. № 2. С. 27–28. EDN: NECETR.
3. Фокин В. В., Сладкова Л. А. Методика выбора материалов кассеты опорно-поворотного устройства с учетом изменения напряженно-деформированного состояния при эксплуатации // 74 Открытая междунар. студ. науч. конф. СНК-2024, 15–18 апреля 2024 г. Москва, 2024. С. 56–61.
4. Горелова М. В., Сладкова Л. А., Фокин В. В. Методика обеспечения безопасной работы стреловых самоходных кранов // 27-я Московская междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ – МГСУ, 26–27 апреля 2023 г. Москва, 2023. С. 353–357.
5. Чичинадзе А. В. Определение температуры поверхности трения при кратковременных торможениях // Трение твердых тел. Москва: Наука, 1964. С. 85–99.
6. Пат. 2088570 Российская Федерация, МПК С07 С51/41, 53/126. Способ получения солей металлов жирных кислот С8–С22 (металлических мыл) / Голота А. Ф., Морозов Е. Г., Агапов Р. А. № 95118922/04; заявл. 08.11.1995; опубл. 27.08.1997, Бюл. 47.
7. Справочник машиностроителя / Под ред. С. В. Серенсена. В 6 т. Москва: МАШГИЗ, 1962. Т. 3. 652 с.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 705 с.
9. Крагельский И. В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1968. 480 с.

10. Ekemini B. I., Edidiong A. E., Uwemedimo E. U. [et al.]. Oluwaseyi Experimental and theoretical study of corrosion inhibition effect of Cucumeropsis mannii N. seed oil metallic soap of zinc on mild steel surface in sulphuric acid // Advances in Applied Science Research. 2014. № 5 (3). P. 26–53.

11. Успенский И. А., Фадеев И. В., Пестряева Л. Ш. [и др.]. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3 (59). С. 1–11. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-39. EDN: UMMBAX.

СЛАДКОВА Любовь Александровна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта (РУТ), г. Москва.

SPIN-код: 9088-6547

AuthorID (РИНЦ): 1024368

ORCID: 0009-0008-6786-0386

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Адрес для переписки: rich.cat2012@yandex.ru

ФОКИН Валерий Владимирович, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» РУТ, г. Москва.

ORCID: 0009-0003-0941-0217

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Адрес для переписки: valerafokin@inbox.ru

Для цитирования

Сладкова Л. А., Фокин В. В. Изменение напряженно-деформированного состояния элементов опорно-поворотного устройства кранов при эксплуатации // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-22-28.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024 г.

© Л. А. Сладкова, В. В. Фокин

UDC 625.731.8

DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-22-28

EDN: TILVGG

L. A. SLADKOVA

V. V. FOKIN

Russian University of Transport,
Moscow, Russia

MODIFICATION OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF CRANE SLEWING GEAR ELEMENTS WHILE OPERATIONAL CONDITIONS

Despite the high technical level of hoisting equipment purchased abroad, a catastrophic failure of the slewing bearings of these cranes occurs after 3-5 years of service instead of the regulated 15 years. The most characteristic are: wear of 6-polyamide cassettes, cages of gear teeth and turntable; rolling elements falling out of the turntable; squeezing out the sealing tape. To identify the hidden cause of premature failure of the slewing rings of «Liebherr» cranes, the authors carried out the experiment during loading and unloading operations, which shows the tendency of warming up the elements of the slewing support, considering the cyclic nature of the crane operation. It has been established that this process is linear both for cassettes (polyamide 6 material), in which the rolling elements are located,

and for the rolling elements themselves (bearing steel). For 5 loading cycles, the rolling elements warm up to a 40 mm depth to a temperature of about 40-45° C. The proposed working hypothesis allows identifying the hidden cause of premature failure of the slewing support of «Liebherr» cranes operating in central Russia. A change in the stress-strain state of the cassette is established, leading to an increase in wear of the cassettes and rolling elements, since stresses arise between the end of the roller surface and the cassette in the direction of the contact plane.

Keywords: self-propelled jib crane, design diagrams, stress-strain state, slewing support, failures, warm-up, wear, working process.

References

1. Bardyshev O. A. Osobennosti sertifikatsii zarubezhnykh kranov i pod'yemnikov [Features of certification of foreign cranes and hoists] // *Vse krany. Vse Krany*. 2006. No. 3. P. 31–34. (In Russ.).
2. Bardyshev O. A., Stotskaya L. V. IV Ural'skiy kongress pod'yemno-transportnogo oborudovaniya [IV Ural Congress of Lifting and Handling Equipment] // *Mekhanizatsiya stroitel'stva. Mekhanizatsiya Stroitel'stva*. 2011. No. 2. P. 27–28. EDN: NECETR. (In Russ.).
3. Fokin V. V., Sladkova L. A. Metodika vybora materialov kassety oporno-povorotnogo ustroystva s uchetom izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri ekspluatatsii [Method of Selection of Materials of the Cassette of the Slewing Support Device Taking into Account the Change in the Stress-Strain State During Operation] // *74 Otkrytaya mezhdunar. stud. nauch. konf. SNK-2024, 15–18 aprelya 2024 g. 74 Open International Student Scientific Conference SNK-2024, 15-18 April 2024*. Moscow, 2024. P. 56–61. (In Russ.).
4. Gorelova M. V., Sladkova L. A., Fokin V. V. Metodika obespecheniya bezopasnoy raboty strelovykh samokhodnykh kranov [Methods for ensuring the safe operation of self-propelled jib cranes] / *27 Moskovskaya mezhdunar. mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh. 27 Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conf. of Students, Undergraduate Students, Graduate Students and Young Researchers*. Moscow, 2023. P. 353–357. (In Russ.).
5. Chichinadze A. V. Opredeleniye temperatury poverkhnosti treniya pri kratkovremennykh tormozheniyakh [Determination of friction surface temperature during short-term braking] // *Treniye tverdykh tel. Solid Friction*. Moscow, 1964. P. 85–99. (In Russ.).
6. Patent 22088570 Russian Federation, IPC C07 C51/41, 53/126. Sposob polucheniya soley metallov zhirnykh kislot S8-S22 (metallicheskih myl) [Method of producing C8-C22 - aliphatic acid metal salts (Metallic soap)] / Golota A. F., Morozov E. G., Agapov P. A. No. 95118922/04. (In Russ.).
7. Spravochnik mashinostroitelya [Mechanical Engineer's Handbook] // Ed. by S. V. Serensenni. In 6 vols. Moscow, 1962. Vol. 3. 652 p. (In Russ.).
8. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Material Strength Handbook]. Kiev, 1975. 705 p. (In Russ.).
9. Kragelskiy I. V. Treniye i iznos [Friction and wear]. 2nd ed. revised and supplemented. Moscow, 1968. 480 p. (In Russ.).
10. Ekemini B. I., Edidiong A. E., Uwemedimo E. U. [et al.]. Oluwaseyic Experimental and theoretical study of corrosion inhibition effect of Cucumeropsis mannii N. seed oil metallic soap of zinc on mild steel surface in sulphuric acid // *Advances in Applied Science Research*. 2014. No. 5 (3). P. 26–53. (In Russ.).
11. Uspenskiy I. A., Fadeyev I. V., Pestrayeva L. Sh. [et al.] Novyye ingibitory korrozii dlya zashchity sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery] // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye. Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2020. No. 3 (59). P. 1–11. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-39. EDN: UMMBAX. (In Russ.).

SLADKOVA Lyubov Aleksandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia), Professor of Ground Transportation and Technological Means Department, Russian University of Transport (RUT), Moscow.

SPIN-code: 9088-6547

AuthorID (RSCI): 1024368

ORCID: 0009-0008-6786-0386

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Correspondence address: rich.cat2012@yandex.ru

FOKIN Valeriy Vladimirovich, Graduate Student of Ground Transportation and Technological Means Department, RUT, Moscow.

ORCID: 0009-0003-0941-0217

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Correspondence address: valerafokin@inbox.ru

For citations

Sladkova L. A., Fokin V. V. Modification of changes in the stress-strain state of crane slewing gear elements while operational conditions // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-22-28.

Received May 27, 2024.

© L. A. Sladkova, V. V. Fokin

ИНТЕРВАЛЬНЫЕ МНОЖЕСТВА В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Описывается конструктивный подход к геометрическому моделированию интервальных множеств многомерного пространства. Под интервальными множествами понимаются линейные множества k -плоскостей с неопределенными, интервальными параметрами. Рассматривается задание таких множеств интервальным базисом, под которым понимается базис с неопределенностью координат вершин базисного k -симплекса. Геометрические модели таких множеств имеют комбинаторную структуру в виде областей пространства, ограниченных кусочно-линейными гиперповерхностями. Аналитические модели строятся в виде систем интервальных уравнений или в виде систем уравнений и интервальными параметрами. Каждое интервальное множество описывается интервальной функцией, связывающей параметры множества. Множество интервальных функций образует область в пространстве параметров. Анализ взаимного положения областей для нескольких интервальных множеств позволяет судить об их взаимном положении в пространстве. Описанный подход может быть применен к решению ряда теоретических и прикладных задач инженерной геометрии, примеры которых приведены. Теоретический материал статьи иллюстрируется интервальными множествами прямых, некоторые свойства которых описываются аналитически.

Ключевые слова: геометрическая модель, интервальное множество, параметрическое задание, k -плоскость, кусочно-линейная структура, интервальный параметр, гиперплоскость.

Введение. Геометрическое моделирование, анализ, синтез и оптимизация систем в условиях неопределенности является одной из основных задач современной инженерной геометрии. Важную роль в решении этих задач играет интервальная математика, позволяющая учитывать естественную неопределенность, свойственную многим реальным системам. Как самостоятельный раздел математики интервальная математика возникла достаточно давно [1, 2]. В настоящее время теоретические направления её развития заключаются в исследовании интервальных функций [3, 4], разрешимости интервальных уравнений и систем уравнений [5, 6], разработке интервальных подходов к обработке экспериментальных данных [7, 8] и др.

Началу геометрического направления теоретической интервальной математики, видимо, было положено Ю. Г. Стояном в 2006 г. В дальнейшем теоретические разработки его школы послужили основой для решения прикладных геометрических задач размещения, упаковки, раскройки и др. Тогда же были введены понятия интервальной прямой, интервальной плоскости, ..., интервального пространства. В настоящее время развитие этого направления инженерной геометрии приостановилось, вероятно, из-за отсутствия в России соответствующей научной школы. Такая оценка косвенно подтверждается отсутствием опубликованных научных работ данного геометрического направления. Близкие по направлению исследования [9–14].

Целью настоящей работы является исследование линейных интервальных геометрических множеств k -плоскостей на основе интервальной арифметики

с уклоном в геометрическое моделирование систем. Часто встречаются случаи, когда стандартные методы моделирования не являются удовлетворительными из-за сложной структуры и неопределенности факторов и параметров [15]. В связи с этим в настоящее время развиваются и широко используются методы интервального моделирования и интервального анализа сложных систем [16–19]. Однако изучаются в основном алгебраические и вычислительные подходы к решению проблемы. В данной работе предлагается конструктивный подход к изучению и моделированию интервальных геометрических множеств.

Определения и обозначения. Интервальным параметром (ИП) будем называть вещественный числовой параметр, принимающий любые значения из замкнутого промежутка. Обозначение ИП: $[a] = [a^-, a^+] \Leftrightarrow a^- \leq a \leq a^+$.

Интервальным множеством (ИМ) фигур будем называть любое множество, определенное хотя бы одним ИП. Обозначаться такие ИМ будут буквами A, B, C, \dots В данной работе будем рассматривать ИМ k -плоскостей n -мерного евклидова пространства. Обозначаться такие ИМ будут s -ИМ k , где s — размерность ИМ, принимающая значения от 1 до $(k + 1)(n - k)$. Описывается такое множество разрешимой системой линейных интервальных уравнений

$$[A] \cdot [X] = [B], \quad (1)$$

где $[A] = ([a_{ij}])$ — интервальная $(n - k) \cdot m$ -матрица, где $[B] = ([b_i])$ — интервальный m -вектор, $X = (x_1, \dots,$

x_n) — вектор аргументов. Здесь $n - k \leq m \leq \infty$. При $m > n - k$ -система (1) должна быть разрешимой. Это необходимое, но не достаточное условие существования ИМк. Например, 1-ИМ1 представляет собой однопараметрическое ИМ прямых — часть пучка или линейчатой поверхности. В другом крайнем случае $2(n - 1)$ -ИМ1 конструктивно представляет собой линейчатую n -мерную «трубку», в случае $n = 2$ — «бабочку». Если границы «трубки» аппроксимированы кусочно-линейными гиперповерхностями (отсеками гиперплоскостей), то ИМк будем называть **линейным**. С увеличением m и при сохранении условия разрешимости системы (1) n -«трубка» сужается и при $m \rightarrow \infty$ превращается в определенную k -плоскость.

В случае, если система (1) принимает вид

$$[a_i] \cdot [x_i] + [x_n] = [b_i], \quad i = 1, \dots, m,$$

соответствующее $2(n - 1)$ -ИМ1 можно рассматривать двояко: как n -мерную «трубку», заданную своими проекциями на координатные плоскости или как интервальное множество гиперплоскостей, заданное своими интервальными следами на координатных плоскостях. О существовании в заданном ИМ интервального множества гиперплоскостей можно судить по критерию

$$\bigcap_i [b_i] \neq \emptyset.$$

Задание и структура интервальных множеств.

Любая k -плоскость задается своим k -симплексом $S = \{S_0, \dots, S_k\}$, $S_i = (x_1, \dots, x_n)_i$, который называется базисным k -симплексом. Предположим, что хотя бы одна вершина базисного k -симплекса, а в общем случае — все вершины, задается ИП (или хотя бы одним из n). То есть $[S_i] = ([x_1], \dots, [x_n])_i$. Тогда $[S_i]$ представляет собой область n -мерного пространства, ограниченную гиперпараллелепипедом $S_i = [x_1]_i \times \dots \times [x_n]_i$.

Предположим, что для всех значений $i \neq j$ $S_i \cap S_j = \emptyset$. Тогда $(k + 1)(n - k)$ -ИМк задается множеством S_i и условием пересечения с каждым из них. Обратное утверждение неверно.

Поясним это утверждение на примере. Пусть $n = 2, k = 1$. Тогда имеем заданными $S_0 = [x_1]_0 \times [x_2]_0, S_1 = [x_1]_1 \times [x_2]_1, S_i \cap S_j = \emptyset$.

Кроме этого, эти множества упорядочены по каждой координате, то есть их проекции на координатные оси — интервалы расположены по возрастанию значений в одинаковом порядке по каждой оси. Образуется 2-ИМ1. В символической записи $[S_0, S_1] = [0]$. Или

$$\begin{bmatrix} x_1 - [x_1]_0 & x_2 - [x_2]_0 \\ [x_1]_1 - [x_1]_0 & [x_2]_1 - [x_2]_0 \end{bmatrix} = [0].$$

Схема 2-ИМ1 приведена на рис. 1.

Если имеется заданная 2-ИМ1, то $S_0 = [AB], S_1 = [CD]$ — отрезки прямых. Тогда в символической форме $[AB, CD] = [0]$ и в параметрической форме

$$[x_1]_0 = (1 - u_0) x_{1A} + u_0 x_{1B},$$

$$[x_1]_1 = (1 - u_1) x_{1C} + u_1 x_{1D}, \quad 0 \leq u_{0,1} \leq 1.$$

Если $x_{i,0}^+ < x_{i,1}^-$, то 2-ИМ1 на рис. 1 эквивалентны по заданию ИМ1. Действительно, $[AB]$ и $[CD]$ мож-

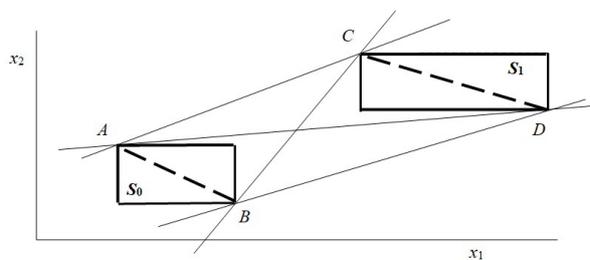


Рис. 1. 2-ИМ1 типа «бабочка» на плоскости

но рассматривать как диагонали прямоугольников S_0 и S_1 .

В общем случае ИМк может быть задано любым набором $\{S_0, S_1, \dots, S_s, a_{s+1}, \dots, a_k\}, \dots, \{S_0, S_1, \dots, S_s, [a]_{s+1}, \dots, [a]_k\}, \dots, \{S_0, \dots, S_k\}$.

Структура таких ИМ следующая. Для $k = n - 1$ ИМк делит пространство на три открытые n -мерные области: «верхнюю», «внутреннюю» и «внешнюю», если задаться направлением вдоль какой-либо координатной оси. Обозначим границу между «верхней» и «внутренней» областями Γ^+ , а между «внутренней» и «нижней» — Γ^- . Для $(k + 1)(n - k)$ -ИМк $\Gamma^+ \cap \Gamma^- = \emptyset$.

В общем случае ИМк образует n -мерную «трубку» с одной границей, отделяющей «внешнюю» область от «внутренней». Во всех случаях граница есть совокупность гиперплоскостей, опорных к соответствующему набору данных. Совокупность опорных гиперплоскостей образует кусочно-линейную структуру границ.

Структуру ИМк проще всего определить в $(k + 1)$ -мерном пространстве. Задав в системе координат $Ox_1 \dots x_{k+1}$ базисные множества $S_i = (0, \dots, 0, [x_i], 0, \dots, 0), i = 1, \dots, k + 1$, уравнение ИМк можно записать в виде

$$\frac{x_1}{[a_1]} + \dots + \frac{x_{k+1}}{[a_{k+1}]} = [1].$$

Тогда очевидно, что Γ образуется множеством k -плоскостей, заданных базисными k -симплексами:

$$S_1 = ((x_1^+, 0, \dots, 0), (0, x_2^+, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, x_{k+1}^+)),$$

$$S_2 = ((x_1^+, 0, \dots, 0), (0, x_2^+, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, x_{k+1}^-)),$$

$$S_{k+1} = ((x_1^-, 0, \dots, 0), (0, x_2^-, 0, \dots, 0), \dots, (0, \dots, 0, x_{k+1}^-)).$$

Отметим важную особенность ИМ. ИМк может быть задана набором областей $\{S_0, \dots, S_m\}, k + 1 \leq m < \infty$.

В этом случае этот набор должен быть совместным, то есть должна существовать хотя бы одна k -плоскость, пересекающая все области.

Рассмотрим пример. Пусть $n = 2, k = 1$. Заданы S_0, S_1, S_2 , которые упорядочены по возрастанию: $[x_1]_0 < [x_1]_1 < [x_1]_2, [[x_2]_0 < [x_2]_1 < [x_2]_2$. Тогда 2-ИМ1 в символической форме описывается системой интервальных уравнений $[AB, CD] = [0], [EF, CD] = [0]$ (рис. 2). Если точкам отрезка АВ приписать параметр $0 \leq u \leq 1: u_A = 0, u_B = 1$, а точкам отрезка EF — параметр $0 \leq v \leq 1: v_E = 0, v_F = 1$, то 2-ИМ1 можно записать в параметрической форме

$$[x_1]_u = (1 - u) x_{1A} + u x_{1B},$$

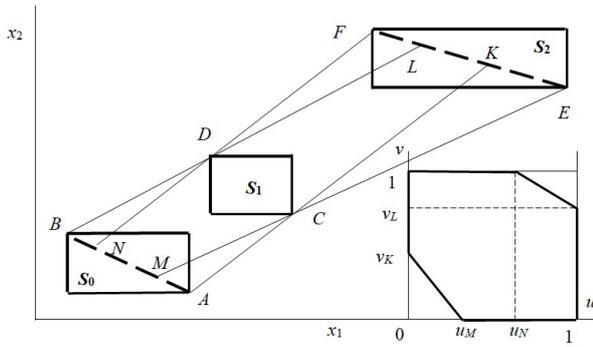


Рис. 2. Задание 2-ИМ1 совместными ИМ и область изменения параметров

$$[x_i]_v = (1 - [v]) x_{iE} + [v] x_{iF}$$

$$[v] = \begin{cases} \left[-\frac{v_K}{u_M} u + v_K, 1 \right], & 0 \leq u \leq u_M, \\ [0, 1], & u_M \leq u \leq u_N, \\ \left[0, \frac{(u - u_N)(v_L - 1)}{1 - u_N} + 1 \right], & u_N \leq u \leq 1. \end{cases}$$

Частный случай пересечения интервальных множеств. Рассмотрим случай, когда несколько n -ИМ($n - 1$), пересекаясь, образуют n -ИМ($n - 1$). Пусть задано множество $\{S_0, \dots, S_m\}$, $m > n$. Оно определяет C_m^n -ИМ($n - 1$), если для любой пары $i \neq j$ $S_i \cap S_j = \emptyset$. Пусть все n -ИМ($n - 1$) определяются уравнениями

$$[x_n] = \sum_{i=1}^{n-1} [a_i]_j x_i + [b]_j, \quad 1 \leq j \leq C_m^n.$$

Обозначим эти n -ИМ($n - 1$) как A_j . Можно доказать, что в пространстве параметров (a, b) каждое A_j будет изображаться точкой некоторой области, ограниченной в подпространстве (a) гиперпараллелепипедом $([a_1] \times \dots \times [a_{n-1}])_j$, а в пространстве (a, b) — двумя гиперповерхностями $b^-(a)_j$ и $b^+(a)_j$. Эти гиперповерхности будут иметь кусочно-линейную структуру. Можно доказать теорему.

ТЕОРЕМА. Множества S_i , $0 \leq i \leq m$, $m \geq n$, являясь совместными, то есть определяют некоторое n -ИМ($n - 1$), тогда и только тогда, когда

$$\bigcap_j ([a_1] \dots [a_{n-1}])_j = [a_1^0] \times \dots \times [a_{n-1}^0] \neq \emptyset$$

и

$$\bigcap_j [b(a_i^0)]_j \neq \emptyset.$$

Предположим, что первое условие не выполняется для $[a_1]_1$ и $[a_1]_2$, которые определяются тремя базисными областями S_0, S_1 и S_2 . Это означает, что либо $[a_1]_1 \cap [a_1]_2 = \emptyset$, либо $[a_2]_1 \cap [a_2]_2 = \emptyset$, либо и то и другое вместе. Всего возможно восемь вариантов невыполнения первого условия. Каждый из этих вариантов означает отсутствие в плоскости (x_1, x_n) такого 2-ИМ1, которое было бы инцидентно проекциям S_0, S_1 и S_2 на эту плоскость.

Если первое условие выполняется, то есть $[a_1]_1 \cap [a_1]_2 = [a_1^0] \neq \emptyset$, то это означает, что в плоскости (x_1, x_n) существуют 2-ИМ1, являющиеся интервальными следами n -ИМ($n - 1$) A_1 и A_2 одновремен-

но или их параллельными следами. Очевидно, что первый вариант возможен только при выполнении второго условия.

Направления дальнейших исследований. Опишем вкратце некоторые возможные направления исследований в области неопределенной, интервальной геометрии как прикладного, так и теоретического характера. В самых общих словах основной задачей инженерной геометрии в настоящее время является задача построения геометрических моделей систем с детерминированными параметрами. Однако существование многочисленных классов систем с неопределенностями позволяет предложить интервальную геометрию как основу для решения проблемы построения моделей таких систем. Например, в рамках этой проблемы могут быть предложены геометрические подходы к решению следующих задач: обработка данных с неопределенностью в наблюдениях, измерениях или вычислениях (интервальные множества многомерных поверхностей отклика), моделирование временных деформаций параметров системы (интервальное прогнозирование свойств систем), построение моделей для систем одного класса (согласование моделей по принципу интервального подобия) и др.

Возникающие при этом геометрические задачи могут быть решены при помощи следующих теоретических исследований в области интервальной геометрии:

- рассмотрение интервальных многомерных объектов как множеств геометрических детерминированных образов. Реализация такого подхода возможна аналитическими и вычислительными методами решения стандартных геометрических задач, дополненных алгоритмами перебора значений параметров из интервальных данных;

- задание интервальных объектов детерминированными параметрами и моделирование их точками некоторых связных областей в пространстве параметров. Форма и положение этих областей позволяет судить о свойствах и отношениях рассматриваемых объектов и решать прикладные задачи (задачи оптимизации или задачи инцидентности, к которым относятся, например, задачи размещения, покрытия, упаковки, компоновки и др.);

- исследование геометрических свойств интервальных отображений, в которых интервальные объекты могут рассматриваться как образы некоторых детерминированных геометрических объектов. Возможна постановка обратной задачи — задачи восстановления детерминированного деформированного объекта по заданному интервальному образу.

В качестве примера теоретического приложения рассмотрим одну из задач распознавания образов, заключающуюся в определении интервальной согласованности недетерминированных систем с интервальной неопределенностью. Параметры систем вычисляются по эмпирическим данным. Чтобы быть интервально согласованными все изучаемые системы должны удовлетворять следующим условиям:

- аналитические модели систем принадлежат одному и тому же классу, но могут иметь разные структуры и разные числовые параметры;

- для каждой системы в пространстве модели существует свое аппроксимирующее интервальное множество, со своей структурой и своими параметрами;

- внутри аппроксимирующего интервального множества никакая аналитическая зависимость вы-

ходного параметра от аргументов не противоречит исходным данным;

— все системы являются совместными в интервальном смысле, то есть их аппроксимирующие интервальные множества принадлежат одному классу, например, являются линейчатыми.

Под интервальной согласованностью систем понимается существование в каждом из аппроксимирующих интервальных множеств такой детерминированной аналитической зависимости выходного параметра от аргументов (геометрического объекта типа гиперповерхности), для которой в каждом из других аппроксимирующих интервальных множеств найдется подмножество аналитических зависимостей, совпадающих с первой с точностью до преобразования подобия.

Заключение. Как показал анализ литературы, интервальная математика и мягкие вычисления играют существенную роль в прикладных исследованиях. Возможность построения интервальной геометрии, основанной на интервальной арифметике, очевидна. Однако опубликованных научных работ в этом направлении крайне мало. В данной статье сделана попытка рассмотреть некоторые способы задания интервальных геометрических образов, а именно k -плоскостей, исследовать их структуру и некоторые свойства.

Интервальные геометрические образы позволяют строить геометрические модели систем в условиях неопределенной информации, которая характерна для большинства сложных систем.

Библиографический список

1. Moore R. E. Interval analyses. New York: Prentice-Hall, 1966. 400 p.
2. Калмыков С. А., Шокин Ю. И., Юлдашев З. Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1986. 224 с.
3. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. Москва: Мир, 1987. 356 с.
4. Левин В. И. Теоретические основы исследования интервальных функций методами интервально-дифференциального исчисления // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 1. С. 335–350. EDN: VOTNGB.
5. Шарый С. П., Шарая И. А. Распознавание разрешимости интервальных уравнений и его приложения к анализу данных // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 3. С. 80–109. EDN: QYPDSX.
6. Shary S. P. Solving the tolerance problem for interval linear equations // Interval Computation. 1994. № 2. P. 6–26.
7. Воцинин А. П. Интервальный анализ данных: развитие и перспективы // Заводская лаборатория. 2002. Т. 68, № 1. С. 118–126.
8. Левин В. И. Интервальные уравнения в задачах обработки данных // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84, № 3. С. 73–78. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-73-78. EDN: YTZRYA.
9. Юничева Н. Р., Юничева Р. Р. Построение множества решений системы интервальных алгебраических уравнений в задаче синтеза систем управления объектами с неточными данными // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVI Междунар. науч.-метод. конф. 2016. С. 258–261. EDN: WNTFSH.

10. Сафронов В. В., Ведерников Ю. В., Шахова О. А. Векторная оптимизация сложных технических систем при неопределенности исходных данных // Информационные технологии. 2001. № 2. С. 49–63.

11. Лакеев А. В., Носков С. И. О множестве решений линейного уравнения с интервально заданным оператором и правой частью // Сибирский математический журнал. 1994. Т. 35, № 5. С. 1074–1084. EDN: UJWFIA.

12. Лакеев А. В. Системы линейных интервальных уравнений с конечным множеством решений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 42–48. EDN: KUFQGH.

13. Целых А. Н., Тимошенко Р. П. Некоторые теоретико-множественные операции над интервальными нечеткими множествами в моделях искусственного интеллекта // Новости искусственного интеллекта. 2000. № 3. С. 139–145.

14. Носков С. И. Точечная характеристика множеств решений интервальных систем линейных алгебраических уравнений // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2018. № 1 (1). С. 8–13. EDN: YXRWER.

15. Левин В. И. Интервальные методы оптимизации систем в условиях неопределенности. Пенза: Изд-во Пензенского технол. ин-та, 1999. 101 с.

16. Кумков С. И. Обработка экспериментальных данных ионной проводимости расплавленного электролита методами интервального анализа // Расплавы. 2010. № 3. С. 86–96. EDN: MKJTL.

17. Скибицкий Н. В. Построение прямых и обратных статистических характеристик объектов по интервальным данным // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1-1. С. 87–98. EDN: XUYZGV.

18. Носков С. И., Врублевский И. П., Заянчуковская В. О. Применение интервального регрессионного анализа для моделирования объектов транспорта // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 3 (47). С. 45–52. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-3-45-52. EDN: FGLKXR.

19. Юрков В. Ю. Основы системы развития и контроля визуально-алгоритмического мышления // Современное образование. 2019. № 1. С. 72–84. DOI: 10.25136/2409-8736.2019.1.26453.

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

SPIN-код: 2414-1438

AuthorID (РИНЦ): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Адрес для переписки: viktor_yurkov@mail.ru

Для цитирования

Юрков В. Ю. Интервальные множества в инженерной геометрии // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 29–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-29-34.

Статья поступила в редакцию 18.03.2024 г.

© В. Ю. Юрков

INTERVAL SETS IN APPLIED GEOMETRY

Geometric modeling of interval sets of multidimensional space is considered. The interval set is determined as a set of k -planes of uncertain interval parameters. Interval parameters may be given by means of interval basis which are k -simplexes having vertex coordinates which are not fully presented (only up to range of values). Geometric images of the sets have combinatorial structure formed by some part of the space and bordered by a set of piecewise linear hyper-surfaces. Analytic model is a system of interval equations which may be transformed to equations with uncertain parameters. The set of interval parameters generate an interval function and geometric image of it is some domain in parametric space. Analyses of mutual position of all domains allows us to determine the behavior of interval sets. Some properties of interval line sets are considered in detail as examples of the proposed approach.

Keywords: geometric model, interval set, parametric determination, k -plane, piecewise linear structure, interval parameter, hyper-plane.

References

1. Moore R. E. Interval analyses. New York: Prentice-Hall, 1966. 400 p. (In Engl.).
2. Kalmykov S. A., Shokin Yu. I., Yuldashev Z. Kh. Metody interval'nogo analiza [Methods of interval analyses]. Novosibirsk, 1986. 224 p. (In Russ.).
3. Alefel'd G., Khertsberger Yu. Vvedeniye v interval'nyye vychisleniya [Introduction in interval computation]. Moscow, 1987. 356 p. (In Russ.).
4. Levin V. I. Teoreticheskiye osnovy issledovaniya interval'nykh funktsiy metodami interval'no-differentsial'nogo ischisleniya [Analysis of interval functions by methods of interval differential calculus] // *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. Systems of Control, Communication and Security*. 2016. No. 1. P. 335–350. EDN: VOTNGB. (In Russ.).
5. Sharyy S. P., Sharaya I. A. Raspoznavaniye razreshimosti interval'nykh uravneniy i ego prilozheniya k analizudannykh [Recognizing solvability of interval equations and its application to data analysis] // *Vychislitel'nyye tekhnologii. Computational Technologies*. 2013. Vol. 18, no. 3. P. 80–109. EDN: QYPDSX. (In Russ.).
6. Shary S. P. Solving the tolerance problem for interval linear equations // *Interval Computation*. 1994. No. 2. P. 6–26. (In Engl.).
7. Voshchinin A. P. Interval'nyy analiz dannykh: razvitiye i perspektivy [Data interval analyses: development and perspectives] // *Zavodskaya laboratoriya. Industrial Laboratory*. 2002. Vol. 68, no. 1. P. 118–126. (In Russ.).
8. Levin V. I. Interval'nyye uravneniya v zadachakh obrabotki dannykh [Interval equations in problems of data processing] // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2018. Vol. 84, no. 3. P. 73–78. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-73-78. EDN: YTZYRA. (In Russ.).
9. Yunicheva N. R., Yunicheva R. R. Postroyeniye mnozhestva resheniy sistemy interval'nykh algebraicheskikh uravneniy v zadache sinteza sistem upravleniya ob'yektami s netochnymi dannymi [Construction of the set of solutions of the system of interval algebraic equations in the problem of synthesis of control systems of objects with imprecise data] // *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii. Informatics: Problems, Methodology, Technologies*. 2016. P. 258–261. EDN: WNTFSH. (In Russ.).
10. Safronov V. V., Vedernikov Yu. V., Shakhova O. A. Vektornaya optimizatsiya slozhnykh tekhnicheskikh sistem pri neopredelennosti iskhodnykh dannykh [Vector optimization of complex technical systems under undetermined input data] // *Informatsionnyye tekhnologii. Information Technology*. 2001. No. 2. P. 49–63. (In Russ.).
11. Lakeyev A. V., Noskov S. I. O mnozhestve resheniy lineynogo uravneniya s interval'no zadannym operatorom i pravoy chast'yu [On the solution set of a linear equation with the right-hand side and operator given by intervals] // *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal. Siberian Mathematical Journal*. 1994. Vol. 35, no. 5. P. 1074–1084. EDN: UJWFIA. (In Russ.).
12. Lakeyev A. V. Sistemy lineynykh interval'nykh uravneniy s konechnym mnozhestvom resheniy [Systems of linear interval equations with finite set of solutions] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. Modern Technologies. System Analysis. Modelling*. 2009. No. 3 (23). P. 42–48. EDN: KUFQGH. (In Russ.).
13. Tsel'ykh A. N., Timoshenko R. P. Nekotoryye teoretiko-mnozhestvennyye operatsii nad interval'nymi nechetkimi mnozhestvami v modelyakh iskusstvennogo intellekta [Some set-theoretic operations on interval fuzzy sets in artificial intelligence models] // *Novosti iskusstvennogo intellekta. Artificial Intelligence News*. 2000. No. 3. P. 139–145. (In Russ.).
14. Noskov S. I. Tochechnaya kharakterizatsiya mnozhestv resheniy interval'nykh sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy [Point characterization of solution sets of an interval system of linear algebraic equations] // *Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v upravlenii slozhnymi sistemami. Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems*. 2018. No. 1 (1). P. 8–13. EDN: YXRWEP. (In Russ.).
15. Levin V. I. Interval'nyye metody optimizatsii sistem v usloviyakh neopredelennosti [Interval method of system optimization in undetermined conditions]. Penza, 1999. 101 p. (In Russ.).
16. Kumkov S. I. Obrabotka eksperimental'nykh dannykh ionnoy provodimosti rasplavennogo elektrolita metodami interval'nogo analiza [Working of experimental data of ionic

conduction molten electrolyte by methods of interval analysis] // *Raspavy. Melts*. 2010. No. 3. P. 86–96. EDN: MKJTIL. (In Russ.).

17. Skibitskiy N. V. Postroyeniye pryamykh I obratnykh statcheskikh kharakteristik ob"yektov po interval'nym dannym [Construction of Direct and Inverse Static Characteristics of the Objects by Interval Data] // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2017. Vol. 83, no. 1–1. P. 87–98. EDN: XUYZGV. (In Russ.).

18. Noskov S. I., Vrublevskiy I. P., Zayanchukovskaya V. O. Primeneniye interval'nogo regressionnogo analiza dlya modelirovaniy ob"yektov transporta [Application of interval regression analysis for modelling of transport objects] // *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2020. No. 3 (47). P. 45–52. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-3-45-52. EDN: FGLKXR. (In Russ.).

19. Yurkov V. Yu. Osnovy sistemy razvitiya I kontrolya vizual'no-algoritmicheskogo myshleniya [Framework of the system of development and control of visual-algorithmic thinking] // *Sovremennoye obrazovaniye. Modern Education*. 2019. No. 1. P. 72–84. DOI: 10.25136/2409-8736.2019.1.26453. (In Russ.).

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

SPIN-code: 2414-1438

AuthorID (RSCI): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Correspondence address: viktor_yurkov@mail.ru

For citations

Yurkov V. Yu. Interval sets in applied geometry // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 29–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-29-34.

Received March 18, 2024.

© V. Yu. Yurkov

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР «ТОР С ТОРОМ» НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КИНЕМАТИКИ

В данной статье представлено теоретическое исследование кинематических пар, известных как «пары катания», используемых во многих областях машиностроения, в частности в механизмах. Данное исследование касается таких тел (звеньев), как геометрические торы, представляющих собой хорошо известные тела вращения. С точки зрения геометрической кинематики, описаны новые представления механических движений тора в соединении «тор с тором» без связи с причинами, которые вызывают это движение. Проанализированы два варианта соединения двух торов: оси торов параллельны и перпендикулярны. По аналогии анализ кинематических пар данного вида расширяет элементы теории кинематических пар и даёт возможность разрабатывать их новые варианты во многих механизмах, используемых в различных областях машиностроения.

Ключевые слова: кинематическая пара, пара катания, тор, подвижность, матрица подвижности, скольжение, катание, верчение.

Введение. Как известно, тор (в геометрии) — это поверхность вращения, образующаяся при вращении окружности в трёхмерном пространстве вокруг оси, копланарной к окружности (не пересекающей её) [1]. Мы будем рассматривать частный случай, когда ось вращения не касается окружности и поверхность имеет кольцевую форму — тор вращения. Искомое исследование является продолжением анализа специфических кинематических пар (КП), которое было дано в [2], где частным случаем КП типа «цилиндр в цилиндре» был представлен вариант пары узкий тор (кольцо) в цилиндре.

Данный вид КП представляет собой новый вид КП, которые встречаются в виде кинематических соединений: звенья сцепления цепи, кинематические пары третьего класса — сферические в виде колец, которые используются во многих механизмах робототехники, автоматических конвейерах и др. Аналитическое исследование соединений вида «тор с тором» впервые было рассмотрено в [3], где представлены пространственные механизмы с высшими КП. Непосредственное изучение поведения механизмов с этими КП было рассмотрено в [4, 5] Т. Билом (T. Bil), а также [6] Дж. П. Мейярдом (J. P. Meijaard), где была предложена полная классификация высших пар, которая может быть смоделирована из нижних пар с одной степенью свободы. Но эти исследования касались в основном кинематического анализа пространственных механизмов на основе звеньев в виде торов и их геометрического моделирования. Суть данного ис-

следования заключается в рассмотрении некоторых особенностей соединений, или сборок по Т. Билу, «тор с тором» как КП и попытке классифицировать их. Это, прежде всего, необходимо для того, чтобы синтезировать механизмы, имеющие наименьшее число связей, большую подвижность КП и, тем самым, увеличение кинематической мобильности механизма, что является одной из наиболее актуальных задач современного машиностроения.

Данное исследование опирается на исследования [2, 7] и дополняет некоторые аспекты, касающиеся высшей пары в виде торов [4–6]. Целесообразность данной работы — это обобщение закономерностей описания связей подвижного и неподвижного торов, с учетом расположения их осей в пространстве, постоянства вида контакта и на основе этого предложить новый вид КП типа «тор с тором», связанный с разработкой КП нового типа за счёт изменения их формы геометрии. Новизна предлагаемой теории заключается в новом подходе описания классификации КП с точки зрения геометрической кинематики, основанной на исследовании движений двух торов, таких как верчение (B), качение (K) и скольжение (C), что позволит в перспективе описать КП всех известных видов [8–10].

Постановка задачи. Задано кинематическое соединение типа «тор с тором» в виде КП: подвижный тор T_2 «внутри» или «снаружи» неподвижного T_1 . Известны геометрические размеры торов T_1 и T_2 , их ограничения по размерам, а также виды расположения осей этих торов между собой: 1) парал-

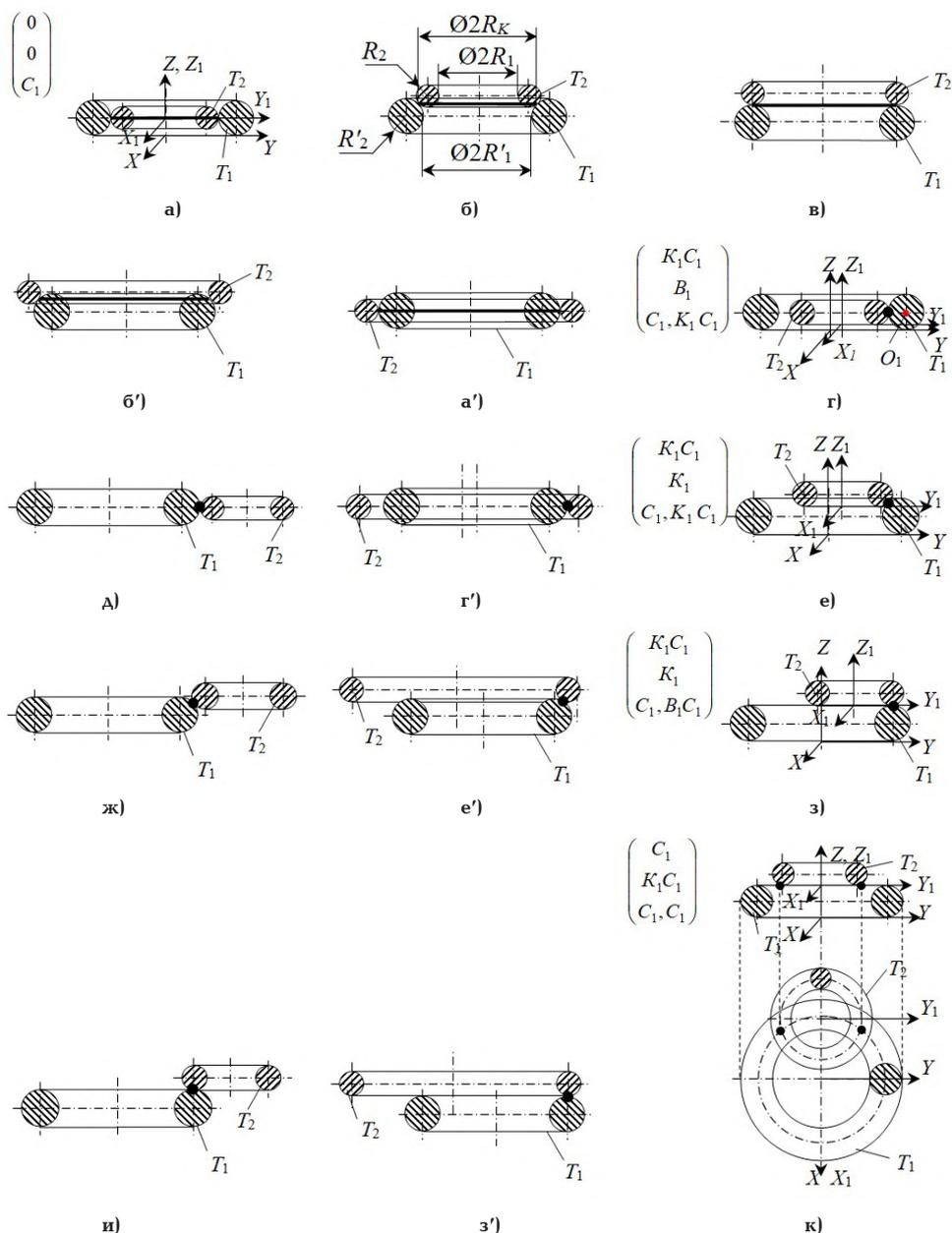


Рис. 1. Оси торов параллельны:
 а, б, в, б', а' — КП $(T_1-T_2)_1^{\text{пар}}$; г, д, г' — КП $(T_1-T_2)_2^{\text{пар}}$; е, ж, е' — КП $(T_1-T_2)_3^{\text{пар}}$;
 з, и, з' — КП $(T_1-T_2)_4^{\text{пар}}$; к — КП $(T_1-T_2)_5^{\text{пар}}$

лельны (коаксиальны); 2) перпендикулярны. Кроме того, для каждого варианта сборки определяется степень подвижности W тора T_2 относительно тора T_1 вдоль и вокруг координатных осей, а также сами движения по сути: скольжение (C), катание (K) и верчение (B). Задача: теоретически проанализировать виды (сборки) КП «тор с тором» (T_1 и T_2) при условии постоянства вида контакта между собой с точки зрения геометрической кинематики и попытаться их классифицировать.

Теория. Под геометрической кинематикой будем понимать движения материальных тел в пространстве с геометрической точки зрения вне связи с силами, определяющими это движение, т.е. без учёта их массы и действующих на них сил [11, с. 181]. Рассматривая движения торов, как КП, будем учитывать, что контакт (связь) торов не меняется: в нашем случае — это точки и окружность. Данные движения аналогичны описанным в [2],

поэтому описание их подвижностей также соответствует известной формуле Сомова–Малышева [12]:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (1)$$

где n — количество подвижных звеньев; p_i — количество пар i -го класса.

Из формулы (1) видно, что для данного исследования: $n = 1$ и p_i — меняются.

Описывать различные виды (сборки) КП «тор с тором» будем по следующим характеристикам:

1) геометрические параметры торов:

R'_1 — внутренний радиус «первого» неподвижного тора; R'_2 — радиус сечения образующей окружности неподвижного тора; R_1 — внутренний радиус «второго» подвижного тора; R_2 — радиус сечения образующей окружности подвижного тора; $R'_3 = R'_1 + 2R'_2$ — внешний радиус «первого» не-

подвижного тора; $R_3 = R_1 + 2R_2$ — внешний радиус «второго» подвижного тора (рис. 1б). В зависимости от геометрических величин размеров этих параметров возможны следующие варианты КП неподвижного T_1 и подвижного T_2 торов:

1) $R_1 = R'_1, R_2 = R'_2$; 2) $R_1 = R'_1, R_2 < R'_2$; 3) $R_1 = R'_1, R_2 > R'_2$; 4) $R_2 = R'_2, R_1 < R'_1$; 5) $R_2 = R'_2, R_1 > R'_1$; 6) $R_3 = R'_1, R'_2$ — любой в пределах реальных размеров КП; 7) $R_1 = R'_3, R_2$ — любой в пределах реальных размеров КП.

Оси рассматриваемых торов T_1 и T_2 могут быть:
 — параллельны (или коаксиальны) между собой;
 — перпендикулярны, т.е. пересекаются или перекрещиваются под углом 90° ;

2) степень подвижности W одного тора относительно другого:

учитывается количество движений W подвижного тора внутри неподвижного вдоль и вокруг координатных осей X, Y и Z , а также сами движения по сути: верчение (B), катание (K) и скольжение (C) [2, с. 16];

3) вид контакта (связи) этих торов — точка или окружность, где k — число контактов в КП [10–12] и их суммарное количество — « n_k ».

Введём системы отсчета: неподвижная $OXYZ$ — для неподвижного T_1 и подвижная $O_1X_1Y_1Z_1$ — для подвижного T_2 .

I. Оси торов T_1 и T_2 параллельны (коаксиальны).

Вид связи этих торов — точки или линии (окружность), т.е. данные кинематические пары будут являться высшими [12]. Для обозначения движений в КП будем использовать матрицу движений в виде «матрицы-столбец»:

$$D = \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix}, K_D = x + y + z, \quad (2)$$

где K_D — количество движений, D_x, D_y, D_z — это движения вдоль или вокруг координатных осей X, Y и Z , которые могут быть трёх видов: B_i — количеством i -верчений, или K_j — количеством j -качений, или C_k — количеством k -скольжений.

Составляем перечень сборок этих КП, где индекс «пар» обозначает параллельность осей вращения T_1 и T_2 .

1) КП (T_1-T_2)^{пар} — см. рис. 1а, б, в, б', а'. Касание торов происходит по окружности, длиной $l = 2\pi R_K$, где R_K — радиус окружности контакта:

$$R'_1 \leq R_K \leq (R'_1 + R'_2) \text{ или } R_1 \leq R_K \leq (R_1 + 2R_2).$$

Анализируя данную КП, по аналогии с [2], и объединяя формулы (2), (3), движения T_2 с тором T_1 можно обозначить следующим образом:

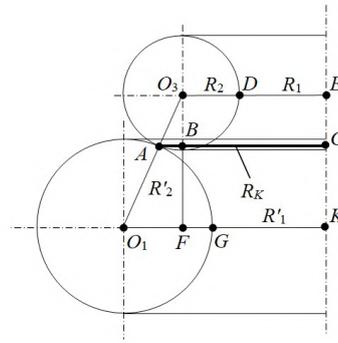
$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ C_1 \end{pmatrix}, K_D = 1, \quad (3)$$

где движения ($B_{z1(z)}$) = C_1 — скольжение, при вращениях вокруг оси $Z_1(Z)$; $k = 1$ — одноконтактная КП.

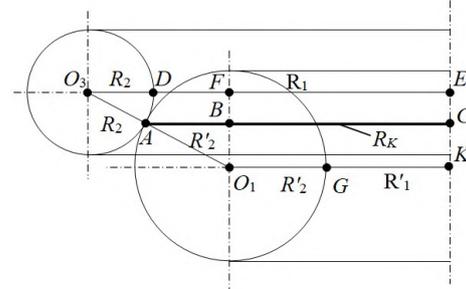
Радиус окружности контакта, величина которого находится из рис. 2:

$$R_K = \frac{R_2(R'_1 + R'_2) + R'_2(R_1 + R_2)}{(R_2 + R'_2)}. \quad (4)$$

По формуле (1): $W = 6 \cdot 1 - 5 \cdot 1 = 1$.



а)



б)

Рис. 2. Определение радиуса контакта в КП (T_1-T_2)^{пар}. а) $(R_1 + R_2) \leq (R'_1 + R'_2)$; б) $(R_1 + R_2) \geq (R'_1 + R'_2)$

Обозначения на рис. 2а: $O_1G = O_1K = R'_2$; $GK = R'_1$; $O_3D = R_2$; $DE = R_1$.

Искомой величиной является радиус R_K — радиус окружности контакта: $R_K = AC = AB + BC = AB + (R_1 + R_2)$.

Из подобных треугольников $\Delta O_1O_3F, \Delta AO_3B$ находим: $\frac{O_1O_3}{O_1F} = \frac{AO_3}{AB} \Rightarrow \frac{R_2 + R'_2}{(R'_1 + R'_2) - (R_1 + R_2)} = \frac{R_2}{AB}$,

откуда $AB = \frac{R_2[(R'_1 + R'_2) - (R_1 + R_2)]}{(R_2 + R'_2)}$. Тогда

$$R_K = \frac{R_2[(R'_1 + R'_2) - (R_1 + R_2)]}{(R_2 + R'_2)} + (R_1 + R_2) \text{ или, упрощая,}$$

находим:

$$R_K = \frac{R_2(R'_1 + R'_2) + R'_2(R_1 + R_2)}{(R_2 + R'_2)}. \quad (5)$$

Аналогично из рис. 2б находим:

$$R_K = (R'_1 + R'_2) + \frac{R'_2[(R_1 + R_2) - (R'_1 + R'_2)]}{(R_2 + R'_2)}$$

или

$$R_K = \frac{R_2(R'_1 + R'_2) + R'_2(R_1 + R_2)}{(R_2 + R'_2)}. \quad (6)$$

Видно, что формулы (5) и (6) — идентичны.

Таким образом, рис. 1а, б, в, б', а' (сборкам) соответствует одна КП — **КП (T_1-T_2)^{пар}**.

При описании следующих сборок КП будем учитывать, что верчение и катание рассматриваются в таком диапазоне углов поворота, а скольжение — в таких перемещениях, когда возможны сами эти движения и данная сборка КП не сможет перейти в другую.

2) КП (T_1-T_2)^{пар} — рис. 1г, д, г'. Касание торов осуществляется по средней линии в точке, $R_K = (R_1 + 2R_2) = R'_1$ или $R_K = (R'_1 + 2R'_2) = R'_1$:

$$D = \begin{pmatrix} K_1 C_1 \\ B_1 \\ C_1, K_1 C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (7)$$

где движения $(B_x) = K_1 C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = B_1$ — верчение при вращении вокруг оси Y ; $(B_z) = C_1, K_1 C_1$ — одно скольжение при вращении вокруг оси Z_1 и скольжение и качение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтатная КП, $W = 3$.

3) КП $(T_1 - T_2)_3^{\text{нар}}$: см. рис. 1е, ж, е'. Касание торов происходит в точке, $R'_1 < R_k < (R'_1 + R'_2)$ или $(R'_1 + R'_2) < R_k < (R'_1 + 2R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} K_1 C_1 \\ K_1 \\ C_1, K_1 C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (8)$$

где движения $(B_x) = K_1 C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = K_1$ — качение при вращении вокруг оси Y ; $(B_z) = C_1, K_1 C_1$ — одно скольжение при вращении вокруг оси Z_1 и скольжение и качение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтатная КП, $W = 3$.

4) КП $(T_1 - T_2)_4^{\text{нар}}$ — см. рис. 1з, и, з'. Касание торов осуществляется в верхней точке окружности, когда её радиус равен: $r = (R'_1 + R'_2)$ или $r = (R_1 + R_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} K_1 C_1 \\ K_1 \\ C_1, B_1 C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (9)$$

где движения $(B_x) = K_1 C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = K_1$ — качение при вращении вокруг оси Y ; $(B_z) = C_1, K_1 C_1$ — одно скольжение при вращении вокруг оси Z_1 и скольжение и качение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтатная КП, $W = 3$.

5) КП $(T_1 - T_2)_5^{\text{нар}}$ — см. рис. 1к. Касание торов происходит в двух точках по поверхности:

$$D = \begin{pmatrix} C_1 \\ K_1 C_1 \\ C_1, C_1 \end{pmatrix}, K_D = 5, \quad (10)$$

где движения $(\Pi_x) = C_1$ — скольжение при перемещении вдоль оси X ; $(B_y, \Pi_y) = K_1 C_1$ — качение при вращении вокруг оси Y и перемещение вдоль оси Y ; $(B_z) = C_1$ — одно скольжение при вращении вокруг оси Z_1 и одно скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 2$ — двухконтатная КП, $W = 4$.

Итого получилось 5 КП из 15 сборок (табл. 1).

II. Оси торов T_1 и T_2 перпендикулярны (перекрещиваются или пересекаются под углом 90°). Далее, по аналогии, делаем их анализ, где индекс «пер» обозначает — перпендикулярность осей вращения (перекрещиваются под углом 90°) T_1 и T_2 .

1) КП $(T_1 - T_2)_1^{\text{нар}}$ — см. рис. 3а, а'. Торы касаются по окружности, $R_1 = \frac{R'_2}{2}$ или $R'_1 = \frac{R_2}{2}$:

$$D = \begin{pmatrix} C_1 \\ 0 \\ C_1 \end{pmatrix}, K_D = 2, \quad (11)$$

Таблица 1

Вид сборки в КП, n_k	Подвижность КП, W			Σn_k
	1	3	4	
Одноконтатные КП, n_1	5	9		14
Двухконтатные КП, n_2			1	1
Итого	5	9	1	15

где движения $(B_{x1}) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси $X_1(X)$; $(B_z) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтатная КП, $W = 2$.

2) КП $(T_1 - T_2)_2^{\text{нар}}$ — см. рис. 3б, б'. Контакт торов осуществляется в двух точках, $R'_1 = (R_1 + 2R_2)$ или $R_1 = (R'_1 + 2R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} C_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{pmatrix}, K_D = 3, \quad (12)$$

где движения $(B_{x1(x)}) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси $X_1(X)$; $(B_{y1(y)}) = B_1$ — верчение при вращении вокруг оси $Y_1(Y)$; $(B_{z1(z)}) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси $Z_1(Z)$; $k = 2$ — двухконтатная КП, $W = 3$.

3) КП $(T_1 - T_2)_3^{\text{нар}}$ — см. рис. 3г, г, е. Торы касаются в двух точках, где «радиус окружности» контакта равен $R_k = \frac{(R_1 + 2R_2)(R'_1 + R'_2)}{R_1 + 2R_2 + R'_2}$:

$$D = \begin{pmatrix} C_1 \\ K_1 \\ C_1 \end{pmatrix}, K_D = 3, \quad (13)$$

где движения $(B_{x1(x)}) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси $X_1(X)$; $(B_{y1(y)}) = K_1$ — качение при вращении вокруг оси $Y_1(Y)$; $(B_{z1(z)}) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси $Z_1(Z)$; $k = 2$ — двухконтатная КП, $W = 3$.

4) КП $(T_1 - T_2)_4^{\text{нар}}$ — рис. 3ж и рис. 4з, и, к, ж', л. Касание происходит по средней их линии в одной точке:

$$D = \begin{pmatrix} C_1, K_1 C_1 \\ B_1 \\ K_1 C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (14)$$

где движения $(B_{x1}; B_x; B_x) = C_1, K_1 C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси X_1 и качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = B_1$ — верчение при вращении вокруг оси $Y_1(Y)$; $(B_z) = K_1 C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтатная КП, $W = 3$.

5) КП $(T_1 - T_2)_5^{\text{нар}}$ — см. рис. 4м, н, о, п, р. Касание торов осуществляется в одной точке дуги тора T_1 от R' до $(R'_1 + R'_2)$ или от $(R'_1 + R'_2)$ до $(R'_1 + 2R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} C_1, K_1 C_1 \\ K_1 \\ K_1 C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (15)$$

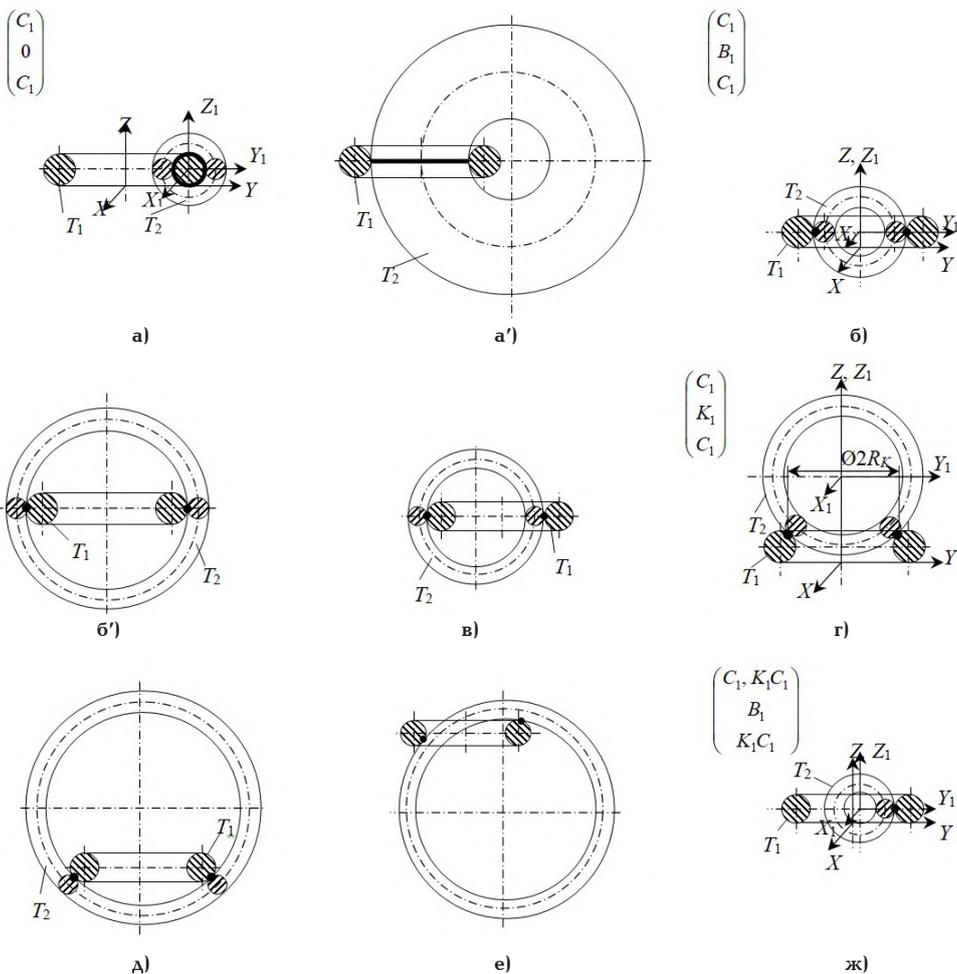


Рис. 3. Оси торов перпендикулярны: а, а' — КП $(T_1-T_2)_{1\text{пер}}$; б, б' — КП $(T_1-T_2)_{2\text{пер}}$; г, д, е — КП $(T_1-T_2)_{3\text{пер}}$; ж — КП $(T_1-T_2)_{4\text{пер}}$

где движения $(B_{x1}; B_x; B_x) = C_1, K_1C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси X_1 и качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = K_1$ — качение при вращении вокруг оси $Y_1(Y)$; $(B_z) = K_1C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтактная КП, $W = 3$.

6) КП $(T_1-T_2)_{6\text{пер}}$ — см. рис. 4с, т. Торы касаются в верхней её точке окружности тора T_1 , когда её радиус равен: $r = (R'_1 + R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} C_1, K_1C_1 \\ K_1 \\ B_1C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (16)$$

где движения $(B_{x1}; B_x; B_x) = C_1, K_1C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси X_1 и качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = K_1$ — качение при вращении вокруг оси $Y_1(Y)$; $(B_z) = B_1C_1$ — качение при вращении вокруг оси Z_1 и скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтактная КП, $W = 3$.

7) КП $(T_1-T_2)_{7\text{пер}}$ — см. рис. 4у, ф. Касание торов осуществляется в одной точке дуги тора T_1 от R'_1 до $(R'_1 + R'_2)$ или от $(R'_1 + R'_2)$ до $(R'_1 + 2R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} K_1C_1 \\ C_1, K_1 \\ K_1, C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (17)$$

где движения $(B_x) = K_1C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = C_1, K_1$ — скольжение при вращении вокруг оси Y_1 и качение при вращении вокруг оси Y ; $(B_z) = K_1, C_1$ — качение при вращении вокруг оси Z_1 и скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтактная КП, $W = 3$.

8) КП $(T_1-T_2)_{8\text{пер}}$ — см. рис. 4х. Касание торов происходит в верхней точке окружности тора T_1 , когда её радиус равен $r = (R'_1 + R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} K_1C_1 \\ C_1 \\ B_1, K_1C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (18)$$

где движения $(B_x) = K_1C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = C_1$ — скольжение при вращении вокруг оси Y_1 ; $(B_z) = B_1, K_1C_1$ — качение при вращении вокруг оси Z_1 и качение и скольжение при вращении вокруг оси Z ; $k = 1$ — одноконтактная КП, $W = 3$.

9) КП $(T_1-T_2)_{9\text{пер}}$ — см. рис. 4ц. Касание торов осуществляется в крайней правой **точке** окружности тора T_1 , когда её радиус равен $r = (R'_1 + 2R'_2)$:

$$D = \begin{pmatrix} K_1C_1 \\ B_1, C_1 \\ K_1, C_1 \end{pmatrix}, K_D = 6, \quad (19)$$

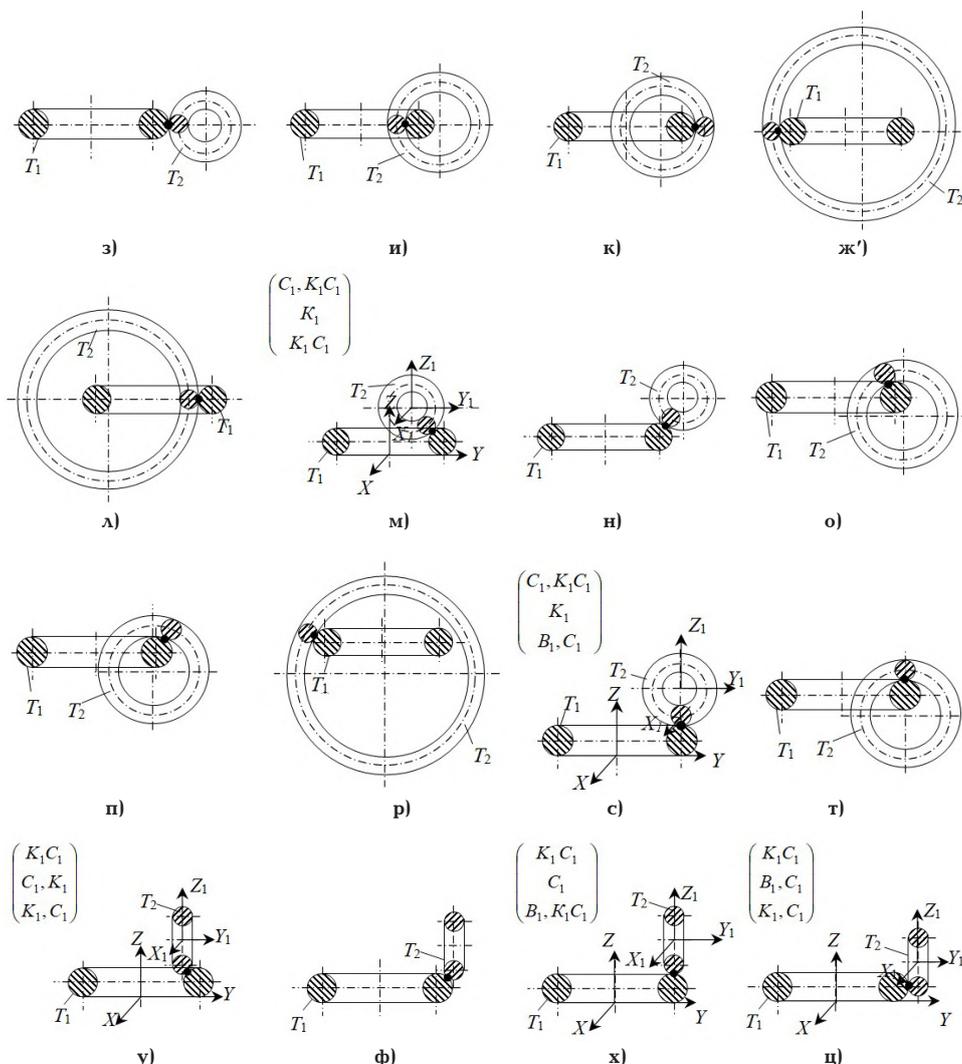


Рис. 4. Оси торов перпендикулярны:
 з, и, к, ж', л — КП $(T_1-T_2)_4^{пер}$; м, н, о, п, р — КП $(T_1-T_2)_5^{пер}$; с, т — КП $(T_1-T_2)_6^{пер}$;
 у, ф — КП $(T_1-T_2)_7^{пер}$; х — КП $(T_1-T_2)_8^{пер}$; ц — КП $(T_1-T_2)_9^{пер}$

где движения $(B_x) = K_1C_1$ — качение и скольжение при вращении вокруг оси X ; $(B_y) = B_1, C_1$ — верчение при вращении вокруг оси Y_1 и скольжение при вращении вокруг оси Y ; $(B_z) = K_1, C_1$ — качение при вращении вокруг оси Z_1 и скольжение при вращении вокруг оси Z , $k = 1$ — одноконтактная КП, $W = 3$.

Итого получилось 9 КП из 25 сборок и сведём их в табл. 2.

Таким образом, получилось 14 КП и 40 сборок типа «тор с тором»: объединяя табл. 1 и табл. 2, получаем табл. 3, в которой объединены все k -контактные пары вида T_1-T_2 .

Результаты исследования.

1. Выделено 14 КП типа T_1-T_2 , которые представлены совокупностью двух видов их кинематического соединения, а именно 15 сборок при параллельном расположении осей торов и 25 сборок при их перпендикулярном положении, что даёт полную классификацию данных КП T_1-T_2 : составлены классификационные таблицы этих КП, которые связывают их подвижности в зависимости от геометрического контакта, от вида, числа движений, а также от количества k -контактных связей (табл. 1—табл. 3), на основании которых, как базисных КП, можно синтезировать большое разнообразие сборок КП, обладающих своими кинематическими

Таблица 2

Вид сборки в КП, n_k	Подвижность КП, W		Σn_k
	2	3	
Одноконтактные, n_1	2	17	19
Двухконтактные, n_2		6	6
Итого	2	23	25

Таблица 3

Вид сборки в КП, n_k	Подвижность КП, W				Σn_k
	1	2	3	4	
Одноконтактные, n_1	5	2	26		33
Двухконтактные, n_2			6	1	7
Итого	5	2	32	1	40

и динамическими свойствами и определяющих назначение механизма.

2. Выявлены новые представления движений в кинематической паре «тор с тором», основан-

ные на кинематической сути таких движений, как скольжение, катание и верчение. С помощью матрицы движений D были количественно описаны кинематические особенности каждой сборки КП.

Заключение. В результате проведенного исследования КП катания типа «тор с тором», были описаны: новые представления движений в кинематической паре «тор с тором», основанные на кинематической сути таких движений, как скольжение, катание и верчение. С помощью матрицы движений D были количественно описаны кинематические особенности каждой сборки КП; определены новые виды (сборки) КП «тор с тором», которые могут быть использованы в механизмах многих отраслей промышленности: транспортном, дорожном и сельскохозяйственном машиностроении (КП типа $T_1 - T_2$ в роботостроении, металлорежущих станках — устройствах крепления с кольцами, сопряжения стопорных колец и др.), самолетостроение (КП типа $T_1 - T_2$ в механизмах шасси — поддерживающие колёса), производство вооружения и военной техники. Именно в этих механизмах наблюдается необходимость изменения подвижности КП типа $T_1 - T_2$ за счет сочетания движений, таких как качение, скольжение и верчение.

Библиографический список

1. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд. Москва: Наука, 1986. 544 с.
2. Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю. Анализ кинематических пар катания типа «цилиндр в цилиндре» // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 52–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-52-59. EDN: EPSLHO.
3. Zhou Y. B., Buchal R. O., Fenton F. G., Tan F. R. Kinematic analysis of certain spatial mechanisms containing higher pairs // Mechanism and Machine Theory. 1995. Vol. 30, № 5. P. 705–720. DOI: 10.1016/0094-114X(94)00067-U.
4. Bil T. Optymalna synteza mechanizmu z wyzsza para kinematyczna typu torus – torus // Pomiar, Automatyka, Kontrola. 2007. No. 8. P. 7–9. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSW4-0040-0002> (дата обращения: 12.06.2024).
5. Bil T. Kinematic analysis of a universal spatial mechanism containing a higher pair based on tori // Mechanism and Machine Theory. 2011. Vol. 46, № 4. P. 412–424. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.12.002.
6. Meijaard J. P. Modelling of kinematic higher pairs by lower pairs // Mechanism and Machine Theory. 2024. Vol. 191. 105515. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105515.
7. Верховский А. В. Теория пространственных и плоских кинематических пар // Известия Сибирского механико-машиностроительного института. 1933. № 1 (52). С. 15–32.
8. Дворников Л. Т., Живаго Э. Я. Основы теории кинематических пар: моногр. Новокузнецк: Издат. центр СибГИУ, 1999. 102 с.
9. Живаго Э. Я. Теория и систематизация кинематических пар механических систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2000. 34 с.
10. Дворников Л. Т. Принципиальные уточнения теории кинематических пар // Машиностроение. 2014. № 23. С. 45–73. EDN: TAFWML.
11. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. В 2-х ч. Ч. 1. Статика. Кинематика. Москва: Высшая школа, 1966. 432 с.
12. Артоболовский И. И. Теория механизмов и машин. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1988. 640 с.

ШАМУТДИНОВ Айдар Харисович, кандидат технических наук, профессор Российской академии естественных наук, доцент кафедры «Техническая механика» Омского автобронетанкового инженерного института, г. Омск.

SPIN-код: 4939-6254

AuthorID (РИНЦ): 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ResearcherID: HLN-7822-2023

Адрес для переписки: 1972id@list.ru

ЛЕСНЯК Иван Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий, доцент кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6114-0646

ORCID: 0000-0002-9481-5985

ResearcherID: E-6397-2014

Адрес для переписки: lesnyak.ivan@gmail.com

Для цитирования

Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю. Теоретическое исследование кинематических пар «тор с тором» на основе геометрической кинематики // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-35-43.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024 г.

© А. Х. Шамутдинов, И. Ю. Лесняк

THEORETICAL STUDY OF KINEMATIC PAIRS «TORUS WITH TORUS» BASED ON GEOMETRIC KINEMATICS

The article presents a theoretical study of kinematic pairs known as «rolling pairs» used in many areas of mechanical engineering, in particular, mechanisms. The research concerns such bodies (links) as geometric tori, which are well-known bodies of rotation. From the geometric kinematics, new representations of the mechanical motions of a torus in a «torus-torus» connection are described without the reasons that cause this motion. Two options for connecting two tori are analyzed: the axes of the tori are parallel and perpendicular. By analogy, the analysis of kinematic pairs of this type expands the elements of kinematic pairs theory and allows developing their new variants in many mechanisms used in various fields of mechanical engineering.

Keywords: kinematic pair, rolling pair, torus, mobility, mobility matrix, sliding, rolling, spinning.

References

1. Bronshteyn I. N., Semendiyayev K. A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and college students]. 13th. Moscow, 1986. 544 p. (In Russ.).

2. Shamutdinov A. Kh., Lesnyak I. Yu. Analiz kinematicallykh par kataniya, tipa «tsilindr v tsilindre» [The analysis of kinematic rolling pairs such as «cylinder in cylinder»] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 52–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-52-59. EDN: EPSLHO. (In Russ.).

3. Zhou Y. B., Buchal R. O., Fenton F. G., Tan F. R. Kinematic analysis of certain spatial mechanisms containing higher pairs // *Mechanism and Machine Theory*. 1995. Vol. 30, no. 5. P. 705–720. DOI: 10.1016/0094-114X(94)00067-U. (In Engl.).

4. Bil T. Optymalna synteza mechanizmu z wyzsza para kinematyczna typu torus–torus [Optimal synthesis of a mechanism with a higher torus-torus kinematic pair] // *Pomiary, Automatyka, Kontrola. Measurement, Automatics, Control*. 2007. No. 8. P. 7–9. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSW4-0040-0002> (accessed: 12.06.2024). (In Polish).

5. Bil T. Kinematic analysis of a universal spatial mechanism containing a higher pair based on tori // *Mechanism and Machine Theory*. 2011. Vol. 46, no. 4. P. 412–424. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.12.002. (In Engl.).

6. Meijaard J. P. Modelling of kinematic higher pairs by lower pairs // *Mechanism and Machine Theory*. 2024. Vol. 191. 105515. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2023.105515. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X23002860> (In Engl.).

7. Verkhovskiy A. V. Teoriya prostranstvennykh i ploskikh kinematicallykh par [Theory of spatial and plane kinematic pairs] // *Izvestiya Sibirskogo mekhaniko-mashinostroitel'nogo*

instituta. *Proceedings of the Siberian Mechanical Engineering Institute*. 1933. No. 1 (52). P. 15–32. (In Russ.).

8. Dvornikov L. T., Zhivago E. Ya. Osnovy teorii kinematicallykh par [Fundamentals of the theory of kinematic pairs]. Novokuznetsk, 1999. 102 p. (In Russ.).

9. Zhivago E. Ya. Teoriya i sistematzatsiya kinematicallykh par mekhanicheskikh sistem [Theory and systematization of kinematic pairs of mechanical systems]. Novosibirsk, 2000. 34 p. (In Russ.).

10. Dvornikov L. T. Printsipial'nyye utochneniya teorii kinematicallykh par [Principal summation theory of kinematic pairs] // *Mashinostroyeniye. Mechanical Engineering*. 2014. No. 23. P. 45–73. EDN: TAFWML. (In Russ.).

11. Yablonskiy A. A., Nikiforova V. M. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. V 2-kh ch. Ch. 1. Statika. Kinematika [Course of the theoretical mechanics. In 2 parts. Part 1. Statics. Kinematics]. Moscow, 1966. 432 p. (In Russ.).

12. Artobolevskiy I. I. Teoriya mekhanizmov i mashin [The theory of mechanisms and machines]. 4th ed., revised and supplemented. Moscow, 1988. 640 p. (In Russ.).

SHAMUTDINOV Aydar Kharisovich, Candidate of Technical Sciences, Professor of RAE (Russian Academy of Natural Sciences), Associate Professor of Technical Mechanics Department, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute, Omsk.

SPIN-code: 4939-6254

AuthorID (RSCI): 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ResearcherID: HLH-7822-2023

Correspondence address: 1972id@list.ru
LESNYAK Ivan Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Head, Associate Professor of Machine Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.
SPIN-code: 6114-0646
ResearcherID: E-6397-2014
ORCID: 0000-0002-9481-5985
Correspondence address: lesnyak.ivan@gmail.com

For citations

Shamutdinov A. Kh., Lesnyak I. Yu. Theoretical study of kinematic pairs «torus with torus» based on geometric kinematics // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-35-43.

Received April 26, 2024.

© **A. Kh. Shamutdinov, I. Yu. Lesnyak**

СНИЖЕНИЕ ТРАВМАТИЗМА ПРИ ВНЕДРЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В работе изучен ряд мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций на промышленных предприятиях. С этой целью изначально проведено исследование наиболее вероятных опасных и вредных производственных факторов и статистический анализ аварийных ситуаций в энергетической сфере промышленности за последние семь лет. Исследование показало, что автоматизированная система управления технологическим процессом является наиболее эффективным средством: обеспечивает получение оперативной информации о процессе, состоянии оборудования и средствах управления, существенно сокращает непроизводственные расходы и потери энергоресурсов. Предложено усиление автоматизированной системы управления технологическим процессом путем интеграции модулей оперативно-диспетчерского управления и сопровождения производственного процесса с целью снижения травматизма по причине человеческого фактора.

Ключевые слова: организация производства, риски, опасности, авария, энергопредприятие, программное управление технологическим процессом, человеческий фактор.

Введение. Безопасность труда на производстве является одним из главных аспектов для промышленных предприятий, в том числе энергетической отрасли. Вопрос обеспечения безопасности работников на энергопредприятиях является актуальным и требует формирования комплекса технических и организационных мероприятий для защиты персонала от воздействия электрического тока, электрической дуги и других производственных факторов. Травмы, получаемые при исполнении трудовой деятельности, по характеру происхождения могут быть различны, поэтому снижение травматизма напрямую зависит от такого параметра, как уровень организации производства [1]. На сегодняшний день существует много методик для улучшения и упрощения в управлении организацией системы безопасности, но не все предприятия относятся всерьез к проблеме безопасности и не пользуются новыми методиками.

Кроме того, поддержание безаварийной работы предприятия и обеспечение безопасности сотрудников — одна из самых главных задач, стоящих перед представителями промышленности. Незапланированная остановка непрерывного производства ввиду серьезных поломок приводит не только к нарушению производственного цикла, но и может

стать предшественником несчастных случаев, что далеко не положительно сказывается на работе и репутации предприятия. Поэтому исследование производственных рисков и опасностей в обоих вышеописанных направлениях носит первоочередной характер [2].

Исследование и разработка новейших мероприятий по обеспечению надежной и безопасной работы производства является важным аспектом для энергетических предприятий. Необходимо постоянно совершенствовать систему управления безопасностью, обучать персонал правилам и процедурам безопасной работы, проводить регулярные проверки и аудиты.

Очень важно также делать акцент на профилактике несчастных случаев и травматизма на предприятии. Это поможет не только сохранить здоровье и жизни работников, но и снизить финансовые потери, связанные с простоями в производстве.

Современные технологии и методики позволяют эффективно управлять безопасностью на производстве, и их использование становится необходимостью для любого промышленного предприятия. Поэтому появляется потребность в непрерывной модернизации процессов организации безопасности труда и непрерывной работы предприятия.

Таблица 1

**Взаимосвязь видов чрезвычайных событий
с обстоятельствами их возникновения**

Класс ЧС	Обстоятельство
Природная	Стихийные явления
Техногенная	Выход из строя оборудования, ошибка в проектировании или некорректная установка оборудования, сбой работы техники
Смешанная	Совмещены обе группы обстоятельств

Цель исследования. Целью представленной работы являлось подробное исследование причин травматизма на промышленных предприятиях энергетического сектора для совершенствования существующих систем управления производством.

Основная часть. Современное производство всегда опирается на новейшую информацию и различные методики анализа с целью усовершенствования технологических процессов и обеспечения высокого уровня безопасности труда. При рассмотрении последнего ключевое значение приобретает анализ возможных производственных рисков на предприятии, который основывается на мониторинге организации производства и управления охраной труда. При выявлении недостатков различного рода разрабатывается индивидуальная дорожная карта действий, направленных на снижение вреда и опасностей сотрудникам предприятия. При этом необходимо учитывать такие аспекты, как:

- место;
- область возникновения риска;
- масштабы возможных потерь;
- характер последствий.

Опираясь на эти аспекты, производится анализ и управление производственными рисками [3].

Методы определения анализа рассматривают потенциальные технические (технологические) риски и возможные угрозы для сотрудников предприятия.

К первому направлению, включающему технические (технологические) опасности, относятся:

нарушение технологического процесса, отказ оборудования, отказ системы защиты, работа в аварийном режиме, сбой вычислительной техники, вероятность потерь напряжения и др. А под угрозами для сотрудников подразумеваются все виды воздействия поражающих факторов на человека при авариях на предприятии.

Для любого производства, включая энергетику, происшествия с летальным исходом или аварии, угрожающие жизни или здоровью персонала, являются наиболее критическими событиями. Они могут привести к серьезным последствиям не только для работников, но и для окружающей среды и общества в целом. Поэтому важно предпринимать все возможные меры для предотвращения подобных происшествий и обеспечения безопасности на производстве. Эти чрезвычайные ситуации обусловлены определенными обстоятельствами (табл. 1). В табл. 1 рассмотрена взаимосвязь чрезвычайных ситуаций (ЧС) различных классов с причинами их возникновения.

Наиболее распространенным видом чрезвычайных ситуаций для производства является техногенная авария, которая может быть вызвана различными потенциально опасными факторами. Например, авария на энергетическом объекте может быть вызвана неправильной эксплуатацией оборудования, нарушением технологического процесса, человеческим фактором или природными явлениями, такими как наводнения или землетрясения. В табл. 2 представлены такие факторы, их местоположение и воздействие на сотрудников.

В случае аварии на энергетическом объекте, критическими событиями будут являться, например, взрывы, пожары, выбросы опасных веществ, а также несчастные случаи с летальным исходом или угрозой для здоровья работников.

Для предотвращения техногенных аварий и минимизации их последствий необходимо планировать различные мероприятия профилактического характера, которые учитывают все соответствующие факторы. Важно провести всестороннюю оценку профессиональных рисков для обеспечения безопасных условий труда и специальную проверку рабочих мест, в число которых относятся и диа-

Таблица 2

Предполагаемые производственные факторы для предприятий энергетики

Производственные факторы	Место локализации	Воздействие на персонал
Токсичные вещества, применяемые в технологических процессах	Химический цех, отделение водоподготовки	Отравление химическими веществами, химические ожоги
Взрыво-, пожароопасное оборудование	Трубопроводы, котельные, котлотурбинный цех	Травмы механического, термического и химического характера
Движущие машины и механизмы	Топливо-транспортный цех, погрузочно-разгрузочный цех	Механические травмы
Шум и вибрация	Технологическое оборудование котлотурбинного цеха	Расстройства центральной нервной системы (ЦНС), сердечно-сосудистой системы (ССС), тугоухость, виброблезнь
Электрическое напряжение	Оборудование электрической подстанции, воздушной линии электропередач (ЛЭП)	Электротравмы, электрические травмы, механические травмы
Повышенная температура, повышенная влажность	Котлотурбинный цех, цех термического обессоливания воды	Термические ожоги, тепловой удар, помутнение хрусталика
Электромагнитные поля	Оборудование электрической подстанции, воздушной линии электропередач (ЛЭП)	Расстройства центральной нервной системы (ЦНС), сердечно-сосудистой системы (ССС), помутнение хрусталика, онкозаболевания



Рис. 1. Комплекс мер по поддержанию безаварийной работы основного технологического оборудования

гностика актуального состояния производственных процессов и оборудования, и потенциальные проблемы, связанные с их состоянием. Исходя из этого, возникает необходимость разработки тактики предотвращения производственных аварий и несчастных случаев.

С целью повышения результативности управления системой энергообеспечения предприятия проводят комплекс мер по поддержанию бесперебойной работы основного технологического оборудования в любых условиях (рис. 1).

В последнее время в мире постоянно совершенствуются методы снижения производственных рисков и опасностей [4], и наиболее эффективным среди них является внедрение систем автоматизации технологических процессов. Такого рода комплексы позволяют сопровождать технологические процессы производства целевой продукции в полной мере и поддерживать на высоком уровне работоспособность оборудования вне зависимости от влияния на него различных неблагоприятных факторов. Поэтому к достоинствам применения этих комплексов относятся быстрый отклик на создаваемые обстоятельства (прогнозируемые/непрогнозируемые) и практически мгновенная адаптация к ним [5, 6].

На крупных производственных объектах автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) необходимо усиливать новыми программными разработками для повышения качества управления производством, такими как автоматизированная диспетчерская система (SCADA), корпоративная система передачи данных (КСПД), программы компьютерного зрения и др. [7].

Внедряемые элементы совершенствования систем управления производства положительно от-

Долевое участие несчастных случаев в зависимости от вида производственного объекта

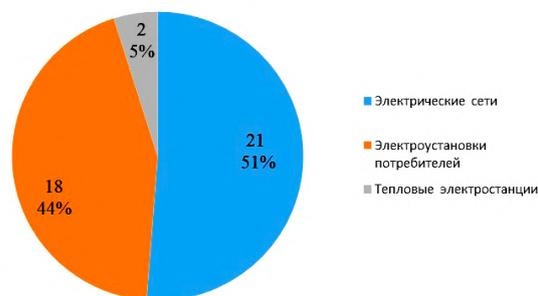


Рис. 2. Аварии по видам энергетических объектов за полный прошедший 2023 год

ражаются на безопасности производства, а именно на оперативности передачи сведений о ходе технологического процесса, о состоянии оборудования и аппаратуры, направленной на предупреждение аварийных ситуаций. А с финансовой стороны, это позволит снизить и затраты на энергоресурсы.

При рассмотрении статистики по аварийности в сфере промышленной энергетики за 12 месяцев предыдущего года были расследованы и зарегистрированы аварии в общем количестве 41 единицы [8]. В зависимости от вида производственного объекта доли аварий распределились следующим образом (рис. 2).

Применительно к 2022 году за тот же временной период численность аварийных ситуаций достигла значения в 20 единиц. В число этих аварий входят случаи и на объектах генерации электроэнергии, и на тепловых электростанциях. Из этого следует, что прошедший год по сравнению с аналогичным периодом 2022 года характеризуется более высоким

Анализ показателей аварийности в динамике за 7 лет

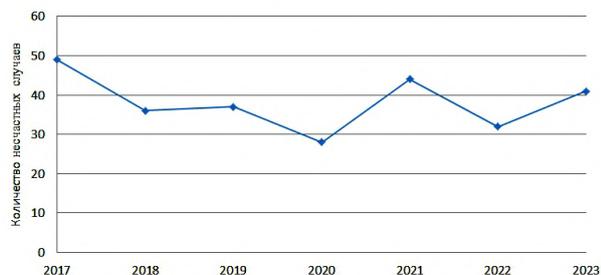


Рис. 3. Анализ показателей аварийности в динамике 2017–2023 гг.

Распределение несчастных случаев по территориальным управлениям

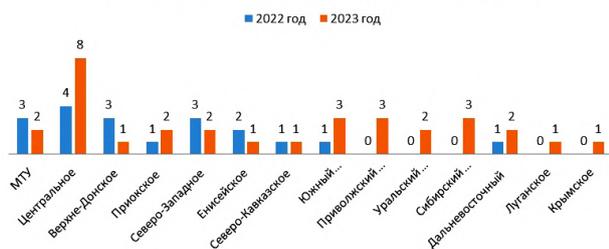


Рис. 4. Распределение аварий, произошедших при эксплуатации электростанций, электрических сетей, тепловых установок сетей и гидротехнических сооружений в 2022–2023 гг. по федеральным округам Российской Федерации

показателем аварийности, который достиг отметки в 30 % [9–11].

Анализ показателей аварийности на объектах энергетического производства за семилетний период позволяет выявить определенные закономерности (рис. 3). Как показано на рис. 3, наблюдается положительная динамика снижения травматизма.

На рис. 4 представлено распределение аварийных ситуаций в энергетике по федеральным округам РФ за двухлетний период.

За последние три года основными причинами аварий на электрооборудовании субъектов энергетики были следующие:

- износ оборудования, элементов;
- нарушение правил эксплуатации и технического обслуживания;
- технические дефекты и производственные недостатки;
- аварии и штатные ситуации;
- нарушение противоаварийного режима автоматики;
- ошибки в управлении организационных и технических мер по обеспечению безопасности;
- различные производственные браки, приводящие к механическим повреждениям или выходу из строя оборудования или деталей;
- нарушение технологического процесса (несоответствие технологическим регламентам и инструкциям);
- отсутствие или недостаточная автоматизация процессов (несовершенство систем автоматического управления и противоаварийной защиты).

Многие предприятия эксплуатируют оборудование, детали с превышением нормативных сроков службы, по этой причине происходит отказ в работе технического оборудования. Устаревшие техно-

Периодичность возникновения технических причин НС

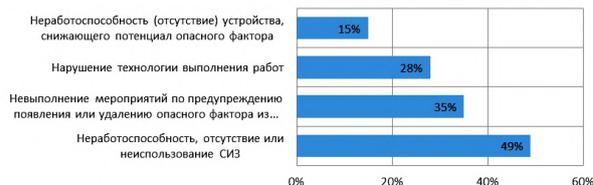


Рис. 5. Распределение технических причин несчастных случаев, произошедших при эксплуатации электростанций, электрических сетей, тепловых установок и сетей и гидротехнических сооружений в 2023 г.

Периодичность возникновения организационных причин НС



Рис. 6. Распределение организационных причин несчастных случаев, произошедших при эксплуатации электростанций, электрических сетей, тепловых установок и сетей и гидротехнических сооружений в 2023 г.

логии также являются причиной отказов. Несоблюдение регламентов и инструкций по эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования, а также недостаточный уровень квалификации персонала, приводящий к неправильным действиям при обслуживании и эксплуатации, усугубляют ситуацию, повышая риск аварий. Эти причины зачастую взаимосвязаны и могут усугублять друг друга, что приводит к увеличению количества и серьезности аварий.

В результате анализа несчастных случаев с летальным исходом за 12 месяцев 2023 года были отмечены наиболее часто встречающиеся организационные и технические причины (рис. 5, 6).

Анализ причин аварий и производственных травм, основанный на отчетах расследований несчастных случаев с летальным исходом, показал, что более 70 % из них были вызваны организационными причинами и менее 30 % — техническими. Причем большая часть технических причин является следствием применения опасных для жизни человека приемов труда и неосторожностью. В результате легко предположить, что более 90 % этих причин классифицируются как человеческий фактор. Говоря другими словами, этот фактор и является базовой причиной возникновения несчастных случаев (с летальным исходом в том числе).

Все перечисленные нарушения могут быть результатом недостаточной эффективности организационных систем управления предприятием, которые, в свою очередь, создают предпосылки для возникновения аварий на предприятии (табл. 3).

Выводы. Таким образом, для обеспечения высокого уровня организации производства необходимо, в первую очередь, произвести анализ причин аварий и потенциальных производственных рисков.

Взаимосвязь несовершенства в организации систем управления предприятием с причинами возникновения аварий в энергетике

Недостатки в организации систем управления	Основные причины аварий
Слабый контроль за техническим состоянием средств диспетчерской связи и организации их эксплуатации	Потеря диспетчерской связи и передачи телеметрической информации
Ненадежный уровень организации производства работ по ремонту энергооборудования	Нарушение в работе противоаварийной или режимной автоматики, обусловленное ошибочными действиями персонала. Неисправность релейной защиты и автоматики
Отсутствие контроля за соблюдением инструктажей по охране труда	Ошибочные действия персонала, вызвавшие отключение объекта электросетевого хозяйства
Несоблюдение сроков эксплуатации оборудования	Износ оборудования в процессе длительной эксплуатации
Низкий уровень организации производства работ на электрических установках	Нарушение технологии производства работ, установленной локальными нормативными документами. Ненадлежащий контроль за осуществлением мероприятий по установке и монтажу системы принудительной вентиляции и вспомогательного электрооборудования. Нарушение работниками рабочих, производственных и должностных инструкций
Высокий уровень ошибок при внедрении в производство нового оборудования	Неправильная работа средств режимной и аварийной автоматики из-за проектных ошибок, отклонений от проектов в процессе монтажа и эксплуатации оборудования. Производственные дефекты оборудования, приводящие к механическим повреждениям, разрушениям оборудования и возможному возгоранию

На основании этого следует разработать дорожную карту, позволяющую снизить потенциальную опасность аварий и несчастных случаев. Среди перспективных и современных приемов наиболее действенным выступает введение автоматизированной системы управления технологическими процессами, выбор которой обоснован необходимостью решения таких поставленных задач, как:

- повышение производительности и качества труда электротехнического персонала (при помощи немедленного информирования работников о появившихся неисправностях);

- повышение надёжности и экономичности работы (сокращается время на выявление поломок благодаря мониторингу и поступлению оперативной информации о различных сбоях в работе оборудования и аварийных отключениях).

Использование на производстве АСУ ТП действительно снижает травматизм на производстве [12], но не решает вопроса возникновения несчастных случаев в результате применения опасных для жизни человека приемов труда и элементарной неосторожности. Допущение человеческих ошибок играет ключевую роль в возникновении несчастных случаев на производстве. Это может быть связано с недостаточной квалификацией персонала, усталостью, отвлечением или недостаточной внимательностью.

С этой целью АСУ ТП, внедряемая на производство, помимо программного сопровождения технологического процесса должна включать в себя интегрированные модули оперативно-диспетчерского управления и сопровождения производственного процесса с точки зрения безопасности труда, например:

- электронная система оформления и ведения нарядов-допусков;

- система доступа к электрооборудованию с помощью электронных ключей;

- программа индивидуальной настройки и расчета потребности в зависимости от различных условий труда сотрудников в средствах индивидуальной защиты (СИЗ);

- система контроля применения работниками СИЗ при производстве работ (так называемое «компьютерное зрение»).

Внедрение такого цифрового новшества в АСУ позволит получить прозрачный и оперативный доступ к нарядам-допускам, обеспечить работу по нарядам-допускам оперативно-выездных бригад через мобильные устройства; предоставить возможность отслеживания хода выполнения работ в реальном времени и гарантирует проведение анализа состояния организационных объектов в области охраны труда и пожарной безопасности.

Усиление АСУ вышеперечисленными модулями приведет к существенному снижению количества аварий и несчастных случаев на производстве, что позволит сохранить жизнь и здоровье работников. Такая интеграция в систему АСУ ТП позволит автоматизировать процессы контроля и управления доступом к электрооборудованию, улучшить контроль за соблюдением правил безопасности при работе под напряжением.

Программа индивидуальной настройки и расчета потребности в средствах индивидуальной защиты поможет каждому сотруднику задействованных подразделений получить необходимую и наиболее эффективную защиту в зависимости от условий труда.

Эффективное использование таких цифровых технологий в производственном процессе не только повысит безопасность труда, но также улучшит производительность и эффективность работы персонала, что в итоге положительно скажется на всей деятельности предприятия. Поэтому внедрение подобных модулей в АСУ ТП является важным шагом к современному и безопасному производству.

Для успешной реализации этой стратегии необходимо обеспечить доступ к актуальным данным, обучить персонал использовать новые технологии и постоянно совершенствовать систему управления производством.

Библиографический список

- Семенова А. Г., Данилова Е. В. Инновационные технологии как эффективные инструменты снижения производственного травматизма // Инновации и инвестиции. 2019. № 8. С. 19–21. EDN: FHNLAR.
- Анализ причин аварий на энергоустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора. 2023 год. URL: http://szar.gosnadzor.ru/activity/energonadzor/nesc_sluch (дата обращения: 07.03.2024).
- Малышева Т. В., Кудрявцева С. С. Организация производственного мониторинга жизненного цикла производства сополимера с использованием технологий LCA // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 4 (108). С. 59–67. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-4-59-67. EDN: MZSMQE.
- Пак А. В. Оценка влияния класса опасности опасных производственных объектов на величину индивидуального риска статистическими методами // Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. В 3 ч. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. Ч. 3. С. 269–272. EDN: NSCSWM.
- Орлов В. А., Юрковская Г. И., Багаева А. П. Внедрение средств автоматизации технологических процессов предприятия // Components of Scientific and Technological Progress. 2023. № 8 (86). С. 90–94. EDN: PYZHBQ.
- Малышева Т. В., Шинкевич А. И. Разработка системы автоматизированного информационного управления процессом инжиниринга экологических производств // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 7. С. 36–41. DOI: 10.17513/snt.38751. EDN: OUNOSQ.
- Травин Г. М., Травин М. М. Системы управления вспомогательным производством промышленных предприятий // Технологии и качество. 2018. № 3 (41). С. 31–35. EDN: YSWYPR.
- Яловец Н. Е., Цурпал А. Ю., Сахоненко Н. И. Анализ пожарной опасности процесса транспортировки природного газа магистральным трубопроводом // Научный журнал. 2019. № 11 (45). С. 38–40. EDN: DDCZOZ.
- Белов И. М. Особенности работы тепловых электростанций на оптовом рынке электроэнергии и мощности РФ // Экономические и социальные аспекты развития энергетики: материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т. Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Иваново: Изд-во ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2020. Т. 6. С. 7. EDN: ОТУКНЕ.
- Сведения об авариях за 2023 год // Ростехнадзор. URL: <http://priok.gosnadzor.ru/activity/control/energo/avar2023/> (дата обращения: 07.03.2024).
- Уроки, извлеченные из аварий // Ростехнадзор. URL: http://cntr.gosnadzor.ru/activity/control/Prom_bezop/nra-prom-bez/uroki-izvelechnnye-iz-avariyu.php (дата обращения: 25.03.2024).
- Горячко Д. Г., Артюх А. О., Шипуль Р. А., Бурлюк В. В. АСКУЭ промышленных предприятий — опыт внедрения // Электроника инфо 2021. URL: https://agat.by/upload/statii_files/files/ASKUE%20promyshlennyh%20predpriyatij%20-%20opyt%20vnedrenija.pdf (дата обращения: 19.02.24)

ПИГИЛОВА Роза Наилевна, преподаватель кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань.

SPIN-код: 1029-9246

AuthorID (РИНЦ): 1155172

ORCID: 0000-0002-2516-1113

Адрес для переписки: rozapigilova@yandex.ru

ФИЛИПОВА Фарида Мизхатовна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» КГЭУ, г. Казань.

SPIN-код: 5969-7290

AuthorID (РИНЦ): 749355

ORCID: 0000-0003-3138-7212

AuthorID (SCOPUS): 36994384500

Адрес для переписки: filippovafer@yandex.ru

АВЕРЬЯНОВА Юлия Аркадьевна, кандидат химических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» КГЭУ, г. Казань.

SPIN-код: 9169-9117

AuthorID (РИНЦ): 254283

ORCID: 0009-0000-4552-4228

Адрес для переписки: bgdkgeu@yandex.ru

Для цитирования

Пигилова Р. Н., Филиппова Ф. М., Аверьянова Ю. А. Снижение травматизма при внедрении автоматизированных систем управления производственных процессов на энергетических предприятиях // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 44–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-44-51.

Статья поступила в редакцию 23.05.2024 г.

© Р. Н. Пигилова, Ф. М. Филиппова, Ю. А. Аверьянова

REDUCTION OF INJURY RATE WHEN INTRODUCING AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF PRODUCTION PROCESSES AT ENERGY ENTERPRISES

The research examines a number of measures to prevent accidents at industrial enterprises. Therefore, the study of the most likely dangerous and harmful production factors and a statistical analysis of emergency situations in the energy sector of the industry over the past seven years were initially conducted. The research showed that an automated process control system is the most effective tool: it provides operational information about the process, the condition of equipment and controls, significantly reduces non-production costs and energy losses. It is proposed to strengthen the automated process control system by integrating operational dispatch control modules and maintenance of the production process in order to reduce injuries due to the human factor.

Keywords: production organization, risks, dangers, accident, energy enterprise, software control of the technological process, human factor.

References

1. Semenova A. G., Danilova E. V. Innovatsionnyye tekhnologii kak effektivnyye instrumenty snizheniya proizvodstvennogo travmatizma [Innovative technologies as effective tools to reduce occupational injuries] // Innovatsii i investitsii. *Innovations and Investments*. 2019. No. 8. P. 19–21. EDN: FHNLAR. (In Russ.).
2. Analiz prichin avariy na energoustanovkakh, podkontrol'nykh organam Rostekhnadzora. 2023 god [Analysis of the causes of accidents at power installations under Rostekhnadzor control]. URL: http://szap.gosnadzor.ru/activity/energonadzor/nesc_sluch/ (accessed: 07.03.2024). (In Russ.).
3. Malysheva T. V., Kudryavtseva S. S. Organizatsiya proizvodstvennogo monitoringa zhiznennogo tsikla proizvodstva sopolimera s ispol'zovaniem tekhnologii LCA [Organization of industrial monitoring of the life cycle of copolymer production using LCA technologies] // 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. 59–67. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-4-59-67. EDN: MZSMQE. (In Russ.).
4. Pak A. V. Otsenka vliyaniya klassa opasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov na velichinu individual'nogo riska statisticheskimi metodami [Evaluation of the influence of the hazard class of hazardous production facilities on the value of individual risk by statistical methods] // Nedelya nauki SPbPU. *Week of Science SPbPU*. In 3 parts. Saint Petersburg, 2020. Part 3. P. 269–272. EDN: NSCSWM. (In Russ.).
5. Orlov V. A., Yurkovskaya G. I., Bagayeva A. P. Vnedreniye sredstv avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov predpriyatiya [Implementation of the automation system for company technological processes] // Components of Scientific and Technological Progress. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2023. No. 8 (86). P. 90–94. EDN: PYZHBQ. (In Russ.).
6. Malysheva T. V., Shinkevich A. I. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo informatsionnogo upravleniya protsessom inzhiniringa ekologicheskikh proizvodstv [Development of the automated information control system for the engineering process of environmental productions] // Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. *Modern High Technologies*. 2021. No. 7. P. 36–41. DOI: 10.17513/snt.38751. EDN: OUNOSQ. (In Russ.).
7. Travin G. M., Travin M. M. Sistemy upravleniya vspomogatel'nykh proizvodstvom promyshlennykh predpriyatiy [Production auxiliary process control systems] // Tekhnologii i kachestvo. *Technologies & Quality*. 2018. No. 3 (41). P. 31–35. EDN: YSWYPR. (In Russ.).
8. Yalovets N. E., Tsurpal A. Yu., Sakhonenko N. I. Analiz pozharnoy opasnosti protsessa transportirovki prirodnogo gaza magistral'nykh truboprovodov [Fire hazard analysis of the process of natural gas transportation by the main pipeline] // Nauchnyy zhurnal. *Scientific Journal*. 2019. No. 11 (45). P. 38–40. EDN: DDCZOZ. (In Russ.).
9. Belov I. M. Osobennosti raboty teplovykh elektrostantsiy na optovom rynke elektroenerгии i moshchnosti RF [Features of thermal power plants operation at the wholesale electricity and capacity market of the Russian Federation] // Ekonomicheskiye i sotsial'nyye aspekty razvitiya energetiki. *Economic and Social Aspects of Energy Development*. In 6 vols. Ivanovo, 2020. Vol. 6. P. 7. EDN: OTYKHE. (In Russ.).
10. Svedeniya ob avariakh za 2023 god [Information on accidents for 2023] // Rostekhnadzor. *Rostekhnadzor*. URL: <http://priok.gosnadzor.ru/activity/control/energo/avar2023/> (accessed: 07.03.2024). (In Russ.).
11. Uroki, izvlechnyye iz avariy [Lessons learnt from accidents] // Rostekhnadzor. *Rostekhnadzor*. URL: http://cntr.gosnadzor.ru/activity/control/Prom_bezop/npa-prom-bez/

uroki-izvelechennye-iz-avariyy.php (accessed: 25.03.2024). (In Russ.).

12. Goryachko D. G., Artyukh A. O., Shipul' R. A., Burlyuk V. V. ASKUE promyshlennykh predpriyatij — opyt vnedreniya [ASCME of industrial enterprises - implementation experience] // Elektronika info 2021. *Elektronika info 2021*. URL: https://agat.by/upload/statii_files/files/ASKUE%20promyshlennyhpredpriyatij-opyt-vnedrenija.pdf (accessed: 19.02.24). (In Russ.).

PIGILOVA Roza Nailevna, Lecturer of Engineering Ecology and Occupational Safety Department, Kazan State Energy University (KSEU), Kazan.

SPIN-code: 1029-9246

AuthorID (RSCI): 1155172

ORCID: 0000-0002-2516-1113

Correspondence address: rozapigilova@yandex.ru

FILIPPOVA Farida Mizkhatovna, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Engineering Ecology and Occupational Safety Department, KSEU, Kazan.

SPIN-code: 5969-7290

AuthorID (RSCI): 749355

ORCID: 0000-0003-3138-7212

AuthorID (SCOPUS): 36994384500

Correspondence address: filippovafer@yandex.ru

AVERYANOVA Yulia Arkadyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Engineering Ecology and Occupational Safety Department, KSEU, Kazan.

SPIN-code: 9169-9117

AuthorID (RSCI): 254283

ORCID: 0009-0000-4552-4228

Correspondence address: bgdkgeu@yandex.ru

For citations

Pigilova R. N., Filippova F. M., Averyanova Yu. A. Reduction of injury rate when introducing automated control systems of production processes at energy enterprises // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 44–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-44-51.

Received May 23, 2024.

© R. N. Pigilova, F. M. Filippova, Yu. A. Averyanova

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАТРАТАМИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА НА РОССИЙСКИХ ОБОРОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В статье исследуются вопросы системного управления затратами по обеспечению качества на российских оборонных предприятиях. Актуальность работы определяется повышенными требованиями к экономии ресурсов, которые предъявляются в настоящее время к предприятиям оборонно-промышленного комплекса. Цель исследования — разработать рекомендации по построению системы управления затратами на качество на российских оборонных предприятиях на основе процессного подхода. Автором предложена обобщённая модель системы формирования затрат по обеспечению качества продукции. При управлении затратами на качество предлагается изначально отталкиваться от цен на проектируемую продукцию. На их основе рассчитывается оптимальная (с учётом существующих условий) производственная себестоимость продукции. Данные по себестоимости используются в качестве ориентира при проведении НИОКР. Особое внимание в работе уделено формированию центров ответственности в системе управления затратами на качество.

Ключевые слова: управление качеством, обеспечение качества, затраты на качество, оборонные предприятия, оборонно-промышленный комплекс, процессный подход.

Введение. В настоящее время в России государство предъявляет повышенные требования к оборонно-промышленному комплексу (ОПК), что связано с проведением специальной военной операции на Украине и повышением уровня рисков военной безопасности страны в целом. При этом важно, что необходимые функциональные и эксплуатационные характеристики оборонной продукции должны достигаться при приемлемых затратах по обеспечению качества. Народное хозяйство страны работает практически в мобилизационном режиме, в связи с чем экономия ресурсов является одной из ключевых задач государственного управления. В сложившихся условиях особую актуальность приобрели проблемы разработки и внедрения на оборонных предприятиях эффективных систем управления затратами на качество (СУЗК).

В рамках рационально построенной СУЗК предприятие имеет возможность не только оптимизировать текущие затраты на качество, но и прогнозировать проблемы в системе менеджмента качества и принимать соответствующие корректирующие меры для обеспечения полного соответствия характеристик продукции требованиям государственного заказчика.

Цель исследования — разработать рекомендации по построению системы управления затратами на качество на российских оборонных предприятиях на основе процессного подхода.

Основная часть. Исследованиям проблем управления затратами на качество посвящены труды

многих экономистов. Прежде всего, представляют интерес работы таких классиков управления качеством, как Дж. Джуран, А. Фейгенбаум, Э. Деминг, Ф. Кросби, К. Исикава и др.

К числу пионеров изучения проблем управления затратами на качество можно отнести Джозефа Джурана и Арманда Фейгенбаума. Они отмечали, что необходимо постоянно отслеживать уровень ответственности между качеством продукции и издержками на его обеспечение и считали целесообразным выделение укрупнённой категории затрат, которую они именовали «стоимость качества» или «совокупные затраты на качество» [1]. В рамках данной категории были выделены четыре группы затрат в соответствии с факторами, определяющими качество продукции [2].

Первая группа — затраты на предотвращение потерь, которые могут возникнуть вследствие низкого качества продукции, то есть собственно затраты по обеспечению качества продукции. Обеспечение качества предусматривает проведение различных мероприятий, к числу которых относятся: организация бездефектного производства, обеспечение необходимого уровня надёжности на стадии разработки продукции, повышение уровня профессиональной компетенции работников, формирование кружков качества, работа с поставщиками комплектующих и т.д.

Вторая группа — затраты на оценку качества продукции. Эти затраты связаны с диагностикой качества продукции: формированием выборок, ви-

зуальным и инструментальным контролем, испытаниями, анализом соответствия фактических характеристик продукции требованиям заказчика и т.д.

Третья группа — затраты, связанные с ошибками. В данной группе выделяются две подгруппы: затраты на устранение потерь от внутреннего брака (относятся к продукции, ещё не покинувшей пределы предприятия) и затраты на устранение потерь от брака, обнаруженного после передачи продукции заказчику.

Четвёртая группа — затраты на минимизацию ущерба, связанного с ухудшением репутации предприятия в результате выпуска некачественной продукции.

Дж. Джуран, А. Фейгенбаум выделяли два основных направления повышения качества продукции и снижения затрат по обеспечению качества: инновации и использование внутренних резервов предприятия. В целом, несмотря на выявленные со временем некоторые недостатки в исследованиях этих авторов, их теоретические наработки и методики являются ориентиром для множества современных специалистов в области качества.

Весомый вклад в исследования проблем управления качеством и затратами на качество внёс Э. Деминг. Его взгляды кардинально отличались от взглядов Джурана и Фейгенбаума. Деминг, в частности, утверждал, что невозможно существенно повысить качество продукции, опираясь исключительно на статистические методы. Он отдавал приоритет стилю управления в организации и полагал, что в основе большинства проблем в области обеспечения качества продукции лежат ошибочные подходы к менеджменту и использование нерелевантного управленческого инструментария. Например, он изучал проблемы, возникающие при применении следующих инструментов в системе менеджмента качества: аттестация персонала, программно-целевое управление, сдельная оплата труда и т.д. [3].

Ф. Кросби утверждал, что ключевая цель менеджмента качества — сведение количества дефектов к нулю. Основная задача любого производственного процесса, по его мнению, — избежание ошибок и, соответственно, дефектов. С этой точки зрения он классифицировал затраты на качество на две категории на основе критерия ошибочности или правильности действий. К первой категории относятся затраты, входящие в соответствии с классификацией Джурана в первую и вторую группу. Ко второй категории относятся затраты, соответствующие третьей группе в классификации Джурана.

Ф. Кросби ввёл в оборот термины «цена соответствия» и «цена несоответствия». Первый обозначает затраты на выпуск качественных изделий (производство продукции с первого раза, с нулевым уровнем брака), второй — затраты, связанные с исправлением дефектов. Соотношение между этими двумя категориями затрат Кросби предлагал использовать в качестве одного из основных показателей для оценки эффективности системы менеджмента качества компании [4].

Таким образом, в управленческой науке уделяется значительное внимание проблемам управления затратами на качество. Это направление исследований является актуальным в связи с тем, что обеспечение качества продукции при оптимальных затратах является одним из важнейших факторов обеспечения конкурентоспособности компаний. Тем не менее существует недостаток исследований, посвящённых данным проблемам в контексте спе-

цифики функционирования российского оборонно-промышленного комплекса.

Формирование эффективной системы управления затратами на качество на предприятиях оборонно-промышленного комплекса, по мнению автора, должно включать следующие обязательные действия:

- создание специального отдела в службе качества, отвечающего за управление профильными затратами;

- регламентация во внутренних документах действующих процедур управления затратами по обеспечению качества (в том числе процедур планирования, учёта, контроля и оптимизации);

- регламентация перспективных процедур управления затратами по обеспечению качества (процедур, которые предстоит внедрить);

- моделирование организационной структуры управления затратами на качество с использованием соответствующего программного обеспечения;

- формальное описание методик управления затратами на качество;

- формирование механизмов стратегического и тактического планирования затрат на качество (планирование должно иметь проактивный, а не реактивный характер);

- формализация объектов управления, бизнес-процессов и процедур управления затратами.

Процесс управления затратами на качество включает в себя следующие процедуры: идентификация, сбор, систематизация, оценка и интерпретация данных по текущим расходам по обеспечению качества изделий [5]. Данные процедуры проводятся на стадиях разработки, тестирования, подготовки производства, производства, хранения, доставки и эксплуатации продукции. Процесс управления затратами подразумевает целенаправленное непрерывное воздействие на факторы, от которых зависит качество оборонной продукции. Основным ориентиром управления является полное удовлетворение требований государственного заказчика.

Таким образом, предприятию ОПК на основе данных по затратам по обеспечению качества необходимо интегрировать процессы производства продукции и процессы контроля соответствия эксплуатационных характеристик изделий требованиям заказчика. Особое внимание следует уделять прогнозированию возникновения возможных проблем. Отсутствие эффективных механизмов прогнозирования на многих российских оборонных предприятиях приводит к тому, что заказчик не получает своевременно необходимый объём продукции надлежащего качества, так как на исправление дефектов требуется дополнительное время [6].

На рис. 1 отражена система управления затратами по обеспечению качества продукции. На входе системы — совокупность бюджетов и нормативов, а также механизмы входного контроля используемых материальных ресурсов. В ядре системы — множество процессов по управлению затратами. На выходе — механизмы обратной связи и информационного обеспечения управления.

Следует выделить особенности предлагаемой схемы для построения системы управления затратами (рис. 1). В основе данной схемы, в отличие от многих схем, предлагаемых в литературе, лежит анализ затрат по процессам и процедурам. Это позволяет контролировать и оптимизировать затраты, с учётом их взаимосвязи, на всех стадиях проектирования, производства и поставки про-

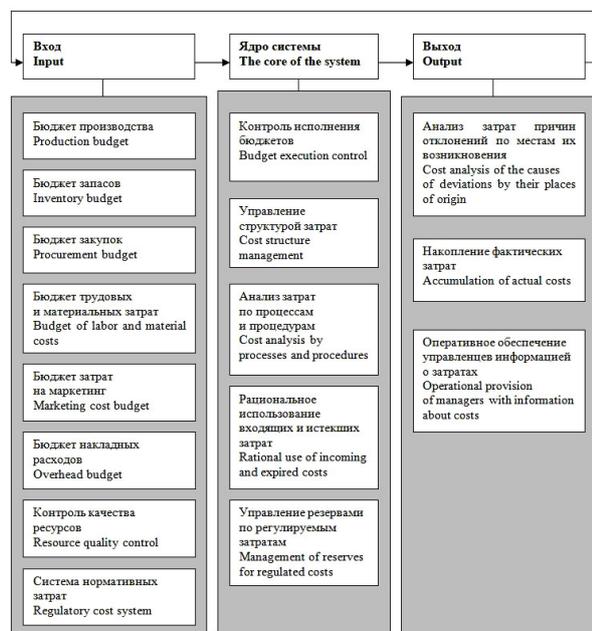


Рис. 1. Система управления затратами по обеспечению качества продукции на оборонных предприятиях

дупки заказчику. Также важной особенностью разработанной схемы является опора на систему бюджетов как на исходную точку всего процесса управления затратами. Именно бюджеты, грамотно составляемые и своевременно корректируемые, дают возможность эффективно отслеживать все источники формирования затрат и выявлять непроизводительные затраты. Кроме того, следует отметить наличие в предлагаемой схеме такого важного блока, как «Оперативное обеспечение управленцев информацией о затратах». Важность эффективного информационного обеспечения управления часто недооценивается специалистами по управлению затратами.

На многих российских предприятиях ОПК на начальной стадии производственного цикла готовится техническая документация, а затем выполняется экономическое обоснование производства, включающее расчёт всех инвестиционных и текущих затрат, в том числе затрат на качество [7]. По мнению автора, данная схема не является оптимальной. Целесообразно изначально отталкиваться от цен на проектируемую продукцию. На их основе рассчитывается оптимальная (с учётом существующих условий) производственная себестоимость продукции. Данные по себестоимости используются в качестве ориентира при проведении НИОКР.

Управление затратами на качество представляет собой комплексный процесс, при осуществлении которого необходимо учитывать множество внутренних и внешних факторов [8]. На большинстве отечественных оборонных предприятий данный процесс требует серьёзной оптимизации. В общей структуре затрат доминируют расходы на исправление дефектов (порядка 80–90 %), в то время как предотвращению производственного брака уделяется мало внимания. При этом известно, что увеличение затрат на профилактические мероприятия с 10 % до 15 % от общего объёма затрат на качество может привести к сокращению потерь от брака примерно на 40 % [9].

В целях формирования эффективной СУЗК автор считает целесообразным классифицировать затраты по обеспечению качества следующим образом:

1. Профилактические затраты — включают расходы на все мероприятия по предупреждению производства бракованной продукции. Выявление и систематизация данных затрат, а также своевременное доведение соответствующей информации до работников дают возможность эффективно управлять формированием данных затрат. Информационное обеспечение управления профилактическими затратами должно предусматривать наличие развитых механизмов обратной связи, позволяющих оперативно корректировать производственный процесс.

2. Затраты на анализ качества: включают совокупность расходов на контрольные, мониторинговые и оценочные мероприятия, в ходе которых определяется текущий уровень параметров качества оборонной продукции, определяются отклонения фактических значений параметров от нормативных значений, выявляются причины отклонений. На основе анализа принимаются решения по проведению корректирующих мероприятий.

3. Затраты на устранение потерь от брака — совокупность расходов, связанных с ликвидацией последних выпусков бракованных изделий (исправление дефектов, выпуск новых изделий надлежащего качества, ведение претензионной работы с заказчиком и т.д.).

Управление затратами в соответствии с предложенной автором классификацией затрат необходимо осуществлять в разрезе основных и вспомогательных бизнес-процессов, формирующих добавленную стоимость, описанных в стандарте ИСО 9001:2000 [10]. К числу основных процессов относятся (раздел 7 стандарта): НИОКР, производство продукции, материально-техническое снабжение, маркетинговая деятельность, послепродажное обслуживание. В состав вспомогательных процессов входят: исследование запросов покупателей, исследование потенциала поставщиков, управление издержками, правовое и информационное обеспечение.

Важную роль в системе управления затратами на качество играет выделение центров ответственности [11]. Для каждого центра необходимо чётко регламентировать состав затрат, ответственность за формирование которых он несёт. Управление по центрам ответственности позволяет идентифицировать проблемные бизнес-процессы и процедуры, выявлять непроизводительные затраты и места их возникновения, разрабатывать и своевременно применять меры по оптимизации затрат [12]. В настоящее время данный подход ещё не получил широкого распространения на российских оборонных предприятиях. С учётом того, что управление по центрам ответственности хорошо зарекомендовало себя на практике во многих отраслях промышленности, можно рекомендовать его повсеместное внедрение в отечественном ОПК.

Для каждого центра ответственности определяются цели, функции, задачи, полномочия и ответственность на основе политики управления себестоимостью предприятия. Кроме того, каждому центру сопоставляются места возникновения затрат, которые он должен контролировать. Вся эта информация фиксируется в положениях о центрах ответственности и должностных инструкциях работников.

Затраты необходимо отслеживать и корректировать на основе распределения по бизнес-процессам на всех стадиях производственного цикла: разработка, тестирование, опытное производство, серийное производство, передача государственному заказчику, эксплуатация. При этом следует использовать методику функционально-стоимостного анализа для оценки обоснованности затрат при осуществлении различных процедур, осуществляемых в рамках системы управления качеством продукции. Основным ориентиром в ходе анализа должен быть уровень добавленной стоимости для государственного заказчика оборонной продукции.

Процедура представляет собой последовательность действий, благодаря которой предприятие решает конкретную задачу. Процедура характеризуется единством времени и места выполнения [13]. К каждому центру ответственности привязывается набор процедур. При этом для каждой процедуры на оборонном предприятии необходимо регламентировать состав затрат и объём потребляемых ресурсов. Следует проводить постоянный мониторинг стоимости последовательных операций по обеспечению качества продукции и отражать эти данные в общей системе управления качеством предприятия. Совокупность процедур по управлению затратами на качество формируется на основе принятого подхода к управлению. Для оборонных предприятий оптимальным представляется процессный подход.

Основное преимущество процессного подхода сводится к тому, что предприятие может получить максимально полную информацию о затратах на всех стадиях производственного цикла в разрезе отдельных бизнес-процессов и процедур [14]. При этом базисом для оценки и контроля затрат являются не те или иные функции изделий, а действия, которые осуществляются в процессе производства.

Для внедрения процессного подхода к управлению затратами на качество на оборонном предприятии автор рекомендует осуществить следующие подготовительные работы:

- идентификация основных бизнес-процессов, оказывающих влияние на затраты по обеспечению качества продукции;
- формализованное описание бизнес-процессов и их последовательностей;
- определение затрат по обеспечению качества и привязка их к конкретным бизнес-процессам и процедурам;
- разработка политики учета затрат на качество, включающей цели, задачи и порядок распределения функций между центрами ответственности;
- назначение сотрудников, ответственных за бизнес-процессы;
- разработка внутренних документов, в которых отражаются процедуры учета и управления затратами.

Процессный подход к управлению затратами на качество подразумевает использование процессного метода описания систем [15]. Основное отличие данного метода от объектного метода заключается в том, что каждому входу сопоставляется выход, а состав элементов системы остаётся неизменным [16]. Процессное описание систем в рамках методологии системного анализа позволяет чётко идентифицировать методы и функции управления затратами на качество, а также установить и детально описать связи между ними.

Процессный подход на оборонных предприятиях целесообразно внедрять комплексно: он дол-

жен охватывать все элементы систем управления качеством и управления затратами. Только в этом случае он может стать мощным инструментом повышения эффективности работы предприятия в целом. Этот инструмент позволяет проводить мониторинг затрат в привязке к различным процессам и процедурам и принимать соответствующие корректирующие меры [17]. Всесторонний анализ затрат позволяет выявлять слабые места и изыскивать резервы снижения себестоимости продукции. Планы по управлению затратами с использованием процессного подхода необходимо включать в общие стратегические и тактические планы развития предприятия.

Таким образом, полная и достоверная информация о затратах на качество продукции, полученная и обработанная с использованием процессного подхода, будет являться важным компонентом системы информационного обеспечения управления оборонным предприятием.

Заключение. В современных условиях, когда к отечественному оборонно-промышленному комплексу предъявляются повышенные требования, проблема обеспечения качества военной продукции при приемлемых затратах приобрела особую значимость. Для решения этой проблемы на каждом оборонном предприятии необходимо сформировать комплексную систему управления затратами по обеспечению качества. Основные задачи этой системы: обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик продукции и минимизация издержек.

Автором предложены практические рекомендации по формированию СУЗК на российских предприятиях оборонно-промышленного комплекса, основанные на использовании процессного подхода к управлению. Следование данным рекомендациям позволит предприятиям идентифицировать и оценивать затраты на качество на всех стадиях производственного цикла, выявлять проблемные области и своевременно принимать меры по оптимизации затрат. В рамках предложенного подхода затраты классифицируются по бизнес-процессам и операциям, а затем списываются на себестоимость изделий. Основным базисом для оценки и оптимизации затрат является процесс, а основным ориентиром — полное удовлетворение требований государственного заказчика к качеству оборонной продукции.

Предложенные рекомендации целесообразно применять после комплексного внедрения процессного подхода на предприятии, что даст возможность интегрировать системы управления качеством и управления затратами.

Библиографический список

1. Джуран Дж. Качество в истории цивилизации. Эволюция, тенденции и перспективы управления качеством. В 3 т. / пер. с англ. Москва: Стандарты и качество, 2021. Т. 1. 208 с.
2. Фейгенбаум А. Контроль качества продукции / пер. с англ. Москва: Логос, 2019. 471 с.
3. Деминг У. Е. Выход из кризиса: новая парадигма управления людьми, системами и процессами / пер. с англ. Москва: Альпина Бизнес Букс, 2022. 417 с.
4. Кросби Ф. Качество и я. Жизнь бизнеса в Америке / пер. с англ. Москва: Стандарты и качество, 2018. 264 с.
5. Цахаева Д. А. Стратегическое управление затратами предприятия // Журнал прикладных исследований. 2022. № 11. С. 395–399. DOI: 10.47576/2712-7516_2022_11_5_395. EDN: ZEEHLY.

6. Дульцев Д. О. Управление затратами на обеспечение качества // Экономика и социум. 2022. № 3-2 (94). С. 532–535. EDN: QKNDLP.

7. Чернавских Е. Н. Совершенствование управления затратами производственного предприятия // Экономика и бизнес: теория и практика. 2024. № 2-2 (108). С. 138–141. DOI: 10.24412/2411-0450-2024-2-2-138-141. EDN: RNIFOY.

8. Файзуллина К. Р. Методы управления затратами фирмы // Экономика и социум. 2023. № 4-1 (107). С. 966–970. EDN: DXKSLA.

9. Резников Р. Л. Критерий качества продукции и показатель успешности хозяйственной деятельности предприятия // Стандарты и качество. 2003. № 2. С. 61–63.

10. ISO 9001:2000. Системы менеджмента качества. Требования. URL: https://certification-portal.ru/wp-content/uploads/2016/10/mezhdunarodnij_standart_ISO_9001.pdf (дата обращения: 05.11.2024).

11. Елисеева О. В., Бушева А. Ю., Гудожникова Е. В. Особенности учета затрат с позиции управления на предприятии // Вестник Российского университета кооперации. 2022. № 1 (47). С. 39–44. EDN: PRERMH.

12. Корзан Л. С., Сафонова М. Г. Управление по центрам ответственности: понятие, виды, особенности // Экономика и социум. 2018. № 7 (50). С. 81–85. EDN: VJNBSF.

13. Арсакаев И. Ш., Кудусов Л., Минкаилова М. М. Основные понятия и подходы в управлении затратами на предприятии // Прикладные экономические исследования. 2023. № 1. С. 136–140. DOI: 10.47576/2949-1908_2023_1_136. EDN: SBVUTE.

14. Кобозева Е. М., Косюк П. В., Мусаева А. С. Оценка и оптимизация системы управления производственными затратами на предприятии // Вестник Адыгейского государ-

ственного университета. Серия: Экономика. 2024. № 2 (340). С. 136–142. DOI: 10.53598/2410-3683-2024-2-340-136-142. EDN: CITRWF.

15. Наугольнова И. А. Инструменты реализации процессного подхода к управлению затратами на предприятиях // Теория и практика общественного развития. 2023. № 7 (183). С. 169–173. DOI: 10.24158/tpor.2023.7.22. EDN: RKVDNB.

16. Дзагоева Д. Б. Проблемные вопросы обеспечения экономической безопасности страны // Индустриальная экономика. 2020. № 3. С. 18–21. DOI: 10.47576/2712-7559_2020_3_18. EDN: TTRREJ.

17. Серхенов М. Э., Аманакоев А. Х., Мухаммедов М. М. Проблемы глобального управления затратами в производственных компаниях и пути их решения // Вестник науки. 2024. № 5 (74). С. 353–356.

БАЛДИНА Анна Сергеевна, директор по качеству АО «Научно-исследовательский институт стали», г. Москва.

SPIN-код: 7527-8878

AuthorID (РИНЦ): 1194322

ORCID: 0000-0001-9287-5530

Для цитирования

Балдина А. С. Построение систем управления затратами по обеспечению качества на российских оборонных предприятиях // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 52–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-52-57.

Статья поступила в редакцию 11.06.2024 г.

© А. С. Балдина

UDC 005.6

DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-52-57

EDN: PIACJQ

A. S. BALDINA

JSC «Scientific Research
Institute of Steel»,
Moscow, Russia

BUILDING COST MANAGEMENT SYSTEMS FOR QUALITY ASSURANCE AT RUSSIAN DEFENSE ENTERPRISES

The article examines the issues of system management of quality assurance costs at Russian defense enterprises. The relevance of the work is determined by the increased requirements for saving resources that are currently imposed on enterprises of the military-industrial complex. The purpose of the work is to develop recommendations for building a quality cost management system at Russian defense enterprises based on a process approach. This work is based on the results of research by Russian and foreign scientists in the field of quality cost management, reflected in scientific articles, monographs, textbooks. In addition, publications of practitioners in the field of quality management in industry journals and on specialized Internet portals were used. The author offers a generalized model of the system of formation of costs for ensuring the quality of products. When managing quality costs, it is proposed to initially start from the prices of the designed products. On their basis, the optimal [taking into account existing conditions] production cost of products is calculated. Cost data is used as a guideline for R&D. Special attention is paid to the formation of responsibility centers in the quality cost management system.

Keywords: quality management, quality assurance, quality costs, defense enterprises, military-industrial complex, process approach.

References

1. Juran J. Kachestvo v istorii tsivilizatsii. Evolyutsiya, tendentsii i perspektivy upravleniya kachestvom. V 3 t. [Quality in the history of civilization. Evolution, trends and prospects of quality management. In 3 vols.] / trans. from Engl. Moscow 2021. Vol. 1. 208 p. (In Russ.).
2. Feigenbaum A. Kontrol' kachestva produktsii [Total quality control] / trans. from Engl. Moscow, 2019. 471 p. (In Russ.).
3. Deming W. E. Vykход iz krizisa: novaya paradigma upravleniya lyud'mi, sistemami i protsessami [Out of the crisis: The new paradigm of managing people, systems and processes] / trans. from Engl. Moscow, 2022. 417 p. (In Russ.).
4. Crosby Ph. Kachestvo i ya. Zhizn' biznesa v Amerike [Quality and Me. Business life in America] / trans. from Engl. Moscow, 2018. 264 p. (In Russ.).
5. Tsakhayeva D. A. Strategicheskoye upravleniye zatratami predpriyatiya [Strategic enterprise cost management] // Zhurnal prikladnykh issledovaniy. *Journal of Applied Research*. 2022. No. 11. P. 395–399. DOI: 10.47576/2712-7516_2022_11_5_395. EDN: ZEEHLY. (In Russ.).
6. Dul'tsev D. O. Upravleniye zatratami na obespecheniye kachestva [Quality assurance cost management] // Ekonomika i sotsium. *Economics and Society*. 2022. No. 3-2 (94). P. 532–535. EDN: QKNDLP. (In Russ.).
7. Chernavskikh E. N. Sovershenstvovaniye upravleniya zatratami proizvodstvennogo predpriyatiya [Improving the cost management of a manufacturing enterprise] // Ekonomika i biznes: teoriya i praktika. *Economics and Business: Theory and Practice*. 2024. No. 2-2 (108). P. 138–141. DOI: 10.24412/2411-0450-2024-2-2-138-141. EDN: RNIFOY. (In Russ.).
8. Fayzullina K. R. Metody upravleniya zatratami firmy [Methods of cost management of the company] // Ekonomika i sotsium. *Economics and Society*. 2023. No. 4-1 (107). P. 966–970. EDN: DXKSLA. (In Russ.).
9. Reznikov R. L. Kriteriy kachestva produktsii i pokazatel' uspekhnosti khozyaystvennoy deyatel'nosti predpriyatiya [The criterion of product quality and the indicator of the success of the economic activity of the enterprise] // Standarty i kachestvo. *Standards and Quality*. 2003. No. 2. P. 61–63. (In Russ.).
10. ISO 9001:2000. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality management systems. Requirements]. URL: https://certification-portal.ru/wp-content/uploads/2016/10/mezhdunarodnij_standart_ISO_9001.pdf (accessed: 05.11.2024). (In Russ.).
11. Yeliseyeva O. V., Busheva A. Yu., Gudozhnikova E. V. Osobennosti ucheta zatrat s pozitsii upravleniya na predpriyatii [Features of cost accounting from the position of management at the enterprise] // Vestnik Rossiyskogo universiteta kooperatsii. *Vestnik of the Russian University Cooperation*. 2022. No. 1 (47). P. 39–44. (In Russ.).
12. Korzan L. S., Safonova M. G. Upravleniye po tsentram otvetstvennosti: ponyatiye, vidy, osobennosti [Management on the centers of responsibility: concept, types, features] // Ekonomika i sotsium. *Economics and Society*. 2018. No. 7 (50). P. 81–85. EDN: VJNBSF. (In Russ.).
13. Arsayev I. Sh., Kudusov L., Minkailova M. M. Osnovnyye ponyatiya i podkhody v upravlenii zatratami na predpriyatii [Basic concepts and approaches in cost management at the enterprise] // Prikladnyye ekonomicheskiye issledovaniya. *Applied Economic Research*. 2023. No. 1. P. 136–140. DOI: 10.47576/2949-1908_2023_1_136. EDN: SBVUTE. (In Russ.).
14. Kobozeva E. M., Kosyuk P. V., Musayeva A. S. Otsenka i optimizatsiya sistemy upravleniya proizvodstvennymi zatratami na predpriyatii [Assessment and optimization of the production cost management system at an enterprise] // Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. *The Bulletin of the Adyge State University. Series Economics*. 2024. No. 2 (340). P. 136–142. (In Russ.).
15. Naugol'nova I. A. Instrumenty realizatsii protsessnogo podkhoda k upravleniyu zatratami na predpriyatiyakh [Tools for implementing the process approach to cost management in enterprises] // Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya. *Theory and Practice of Social Development*. 2023. No. 7 (183). P. 169–173. DOI: 10.24158/tipor.2023.7.22. EDN: RKVDNB. (In Russ.).
16. Dzagoyeva D. B. Problemnyye voprosy obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti strany [Problem issues of ensuring the economic security of the country] // Industrial'naya ekonomika. *Industrial Economics*. 2020. No. 3. P. 18–21. DOI: 10.47576/2712-7559_2020_3_18. EDN: TTRREJ. (In Russ.).
17. Serkhenov M. E., Amanakov A. Kh., Mukhammedov M. M. Problemy global'nogo upravleniya zatratami v proizvodstvennykh kompaniyakh i puti ikh resheniya [Problems of global cost management in manufacturing companies and ways to solution them] // Vestnik nauki. *Vestnik Nauki*. 2024. No. 5 (74). P. 353–356. (In Russ.).

BALDINA Anna Sergeevna, Director of Quality, JSC «Scientific Research Institute of Steel», Moscow.
SPIN-code: 7527-8878
AuthorID (RSCI): 1194322
ORCID: 0000-0001-9287-5530

For citations

Baldina A. S. Building cost management systems for quality assurance at Russian defense enterprises // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 52–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-52-57.

Received June 11, 2024.
© A. S. Baldina

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИМ ПРОЕКТОМ НА ЭТАПЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БАЗЕ ВУЗА

Проведен анализ существующего инструментария, позволяющего обеспечить качество процесса управления научно-техническими проектами на всех стадиях жизненного цикла, реализуемыми на базе вуза. Исследован жизненный цикл проекта от научной идеи до конечного производства или продажи лицензии и выделен этап НИР, для которого рассматриваются предлагаемые рекомендации. Сформированы концептуальные основы качества процесса управления научно-техническим проектом с целью успешной коммерциализации научно-технического продукта на примере разработки нефтепродуктовой тары. Приведены методические рекомендации по управлению рисками научно-технического проекта.

Представленные материалы могут быть использованы при разработке в вузах методических рекомендаций оценки качества процесса управления научно-техническим проектом, позволяющих получить соответствующий экономический эффект.

Ключевые слова: научно-технический проект, коммерциализация, качество, процесс, риски, управление, жизненный цикл, вуз.

Введение. Процессы управления реализацией проекта, связанные с областью их практического применения, включают в себя как определение потребностей и ожиданий заинтересованных сторон, анализ и оценку продвижения проекта при наличии альтернативных подходов, так и разработку и утверждение концепции проекта.

На текущий момент существует ряд проблем в управлении проектами, требующий их анализа и формирования перечня задач, направленных на их устранение. Прежде всего, это объясняется тем, что процесс внедрения результатов НИР в гражданскую сферу, как и в военную, весьма трудоемок, непривычен большинству российских вузов, и как следствие, имеет очень низкий показатель успешности.

Как известно, не каждый научно-технический проект может быть инновационным. Традиционные разработки ориентированы на текущий спрос и основываются на уже существующих методах и инструментах, в то время как инновационные разработки ориентированы на создание нового спроса и несут в себе новые методики и инструменты, позволяющие выводить разработанную научно-техническую продукцию к следующему технологическому уровню.

Согласно [1], инновационный проект должен об-

ладать: 1) новизной, то есть в результате реализации проекта будет получен новый продукт, имеющий качественно новое свойство, в отличие от существующего аналога;

2) наличием технологий, ориентированных на решение задач в рамках приоритетных направлений науки и техники;

3) экономической эффективностью применения, то есть использование данного продукта позволяет заказчику снизить его затраты, в том числе и с точки зрения стоимости его владения.

Целесообразно обратиться к опыту иностранных государств — лидеров в сфере коммерциализации науки.

В статье [2] описаны проблемы взаимодействия науки и производства в таких странах, как Финляндия и Израиль. Опыт академического предпринимательства ученых показывает, что проблемы демонстрации коммерческой ценности продукта позволили осмыслить и трансформировать высшее образование за последнее десятилетие за счет использования новых методов оценки критериев внутри проекта, связанных с ресурсами, временем, скрытыми издержками, рисками, помимо традиционных методов оценки научной обоснованности и достоверности.

В работе [3] описываются процессы и последствия передачи разработанных технологий специ-

алистами, являющимися посредниками в области передачи технологий в израильских вузах. Автор приводит примеры стратегий, которые специалисты используют в своей работе при налаживании отношений между академическим и промышленным сообществами, контроле и защите интеллектуальной собственности вуза, разрешении конфликтов интересов и ценностей, а также затрагивает соответствующие важные нормативные аспекты.

В статье [4] показана хронология внедрения в вузах США стратегического планирования с целью институциональных изменений в сфере коммерциализации как образовательной составляющей, так и результатов интеллектуальной деятельности преподавателей, а также анализ возникающих неудач и трудностей, сопутствующих институциональным изменениям.

Отмечается [5], что в вузах США расширили отношения с промышленностью в части продвижения результатов научных исследований. В коммерческом продвижении проектов ключевую роль занимают администраторы университетов, которые несут ответственность за создание организационной политики и инфраструктуры, соответствующие федеральным законам и законам штата, отвечающие за надзор исследовательских программ.

Рассмотрим особенности процесса управления проектами в российских вузах.

По мнению авторов статьи [6], управление инновационным проектом представляет собой управление системой, которая преобразует исходные данные в результаты инновационной деятельности с применением экономико-организационных инструментов для обеспечения соответствия результата проекта поставленным целям.

В работе [7], авторы отмечают, что в проектной деятельности необходимо участвовать всем сотрудникам вуза, включая: административно-управленческий персонал, профессорско-преподавательский состав, учебно-вспомогательный персонал, инженерно-технических и научных работников. И безусловно, в обязательном порядке необходимо привлечение обучающихся старших курсов к проектам различного характера. При этом особое внимание уделяют проектной грамотности, включающей общую методику управления проектами, параметры координирования проектов, а также единую систему управления проектами.

В статье [8] авторы предлагают к функции менеджмента отнести управление проектами и разработками (УПР). В случае единичного производства каждый продукт является в некоторой степени инновационным, поэтому УПР должно рассматриваться в качестве ключевой задачи менеджмента научного проекта.

Необходимо разобраться, что входит в понятие проектной деятельности в вузе. Согласно [9], проектная деятельность — деятельность, направленная на выполнение проектов, программ и портфелей проектов, обеспечивающих развитие и (или) изменение организации, создание уникальных продуктов или услуг в условиях временных и ресурсных ограничений, и осуществляемая временными командами.

Если рассматривать особенности проектной деятельности в вузах в России, то можно увидеть закономерность: далеко не во всех вузах страны уделяется достаточно внимания процессам управления проектами. Такие структуры, как проектный офис, занимающиеся процессами управления проектной

деятельности, чаще всего являются достаточно молодыми структурами внутри вуза.

Потенциальный инвестор оценивает все проекты с точки зрения будущей получаемой выгоды. Одновременно у разработчика, наоборот, существует острая потребность в привлечении финансирования для проведения научных исследований в цикле создания научно-технической продукции. Для решения данной проблемы важно разработчику подтвердить коммерческий потенциал научно-технической продукции, чтобы потенциальный инвестор смог оценить риски и прибыльность проекта. Для таких целей в вузе необходимо выработать определенную концептуальную основу качества управления научно-техническим проектом с целью успешной коммерциализации.

Постановка задачи. Проведенный информационный анализ показал необходимость в разработке методических рекомендаций оценки качества процесса управления научно-техническим проектом на базе вуза (в нашем случае на примере разработки нефтепродуктовой тары), что предусматривает решение следующих задач:

1) исследовать жизненный цикл проекта от научной идеи до конечного производства или продажи лицензии и выделить этап НИР, для которого рассматриваются предлагаемые рекомендации;

2) сформировать концептуальные основы, содержащие:

— методические рекомендации последовательности действий и решений при управлении научно-техническим проектом;

— методические рекомендации по управлению рисками.

Методические рекомендации последовательности действий и решений при управлении научно-техническим проектом. В данной работе приведен научно-технический проект, результатом которого является конверсионная продукция — разработанный полимерный композиционный материал (ПКМ) на основе полиэтилена для нефтепродуктовой тары (НТ) и создаваемая модульная утилизационная мобильная установка для переработки использованной тары [10–12].

Данный проект основан на трансфере технологии, разрабатываемой в ракетно-космической отрасли, для продукции гражданского назначения с целью снижения техногенного воздействия на окружающую среду в Арктической зоне от результатов эксплуатации и хранения металлической тары для нефтепродуктов путем создания экологически безопасной НТ и комплекса по ее утилизации. Выполнялась в рамках Программы развития Омского государственного технического университета «Приоритет-2030» и носит как национальный характер, ориентированный, в первую очередь, на снижение техногенного воздействия на окружающую среду в районах Арктики, так региональный характер, результаты и эффекты от реализации которого актуальны и для Омского региона. Разработанные решения по утилизации могут применяться для решения региональных задач по утилизации твердых бытовых отходов.

Управление проектом представляет собой систему конкретных мероприятий (видов деятельности), в том числе методов и инструментов, позволяющих оценить качество процессов внутри проекта на всех его стадиях жизненного цикла для достижения коммерческого успеха полученных научно-технических результатов. Данная область регламен-

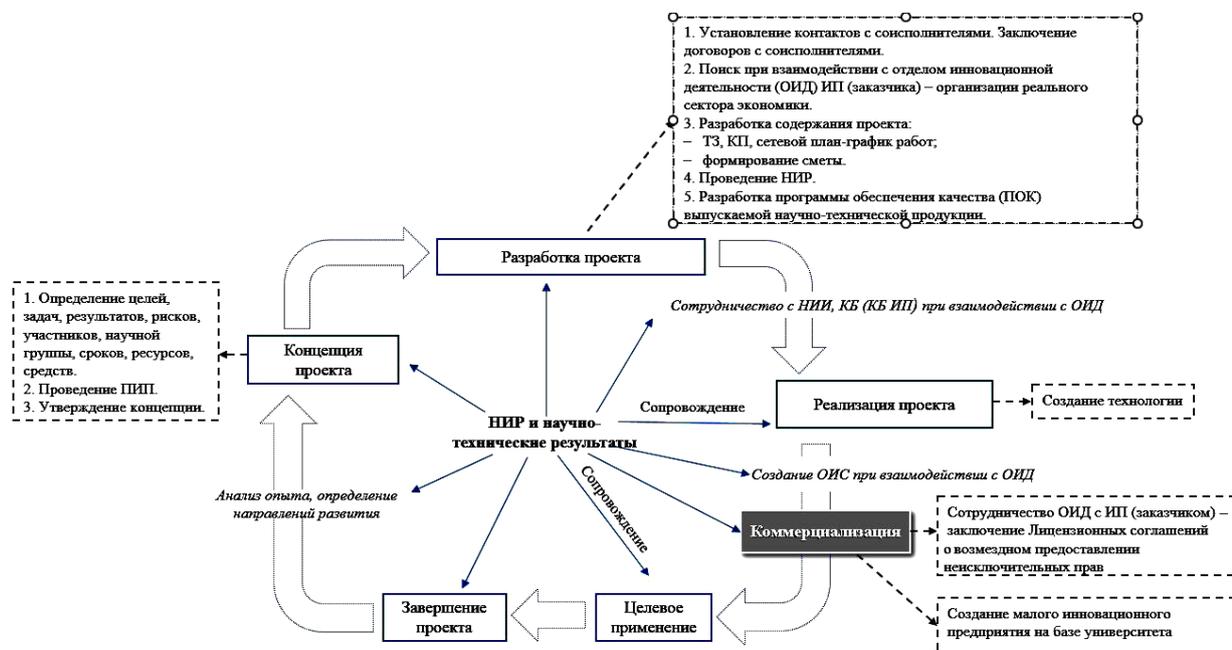


Рис. 1. Схема жизненного цикла проекта в вузе

тируется определенной нормативно-технической базой.

Ниже представлена схема жизненного цикла научно-технического проекта в вузе от научной идеи до конечного производства или продажи лицензии (рис. 1).

На примере рассматриваемого проекта более укрупненно показан этап научно-исследовательских работ стадии создания жизненного цикла, в котором приведен перечень решаемых задач на этапе, а также последовательность процесса управления в соответствии с нормативно-технической и иной документацией (табл. 1).

Этап НИР является одним из наиболее важных этапов, результаты которого переходят в объекты интеллектуальной собственности (ОИС). А также важным шагом является выстраивание цепочки смежников, которые будут участвовать в проведении дальнейших работ на последующих стадиях проекта, и выявление конечных потребителей разрабатываемого продукта. В команде проекта должны состоять сотрудники различных подразделений вуза, ответственные как за саму разработку ОИС, так и за решение правовых, организационных и иных вопросов при сопровождении и реализации самого проекта.

Следующим важным этапом проекта является экспериментальная отработка. В рассматриваемом научном проекте ввиду отсутствия технических возможностей в вузе для производства и проведения соответствующих испытаний экспериментального образца изделия была создана и продолжает дополняться цепочка производственных партнеров, готовых сотрудничать по следующим возможным вариантам, например:

а) производственный партнер заинтересован в предлагаемой тематике, согласен поддерживать финансово университет, согласен на совместное проведение работ по проектированию и изготовлению на имеющихся собственных мощностях экспериментального образца, согласен проводить совместно опытную отработку экспериментального

образца в полевых условиях, согласен участвовать при дальнейшем совместном проведении бизнес-процессов по утилизации твердых бытовых и промышленных отходов на экспериментальном образце (здесь возможна кооперация с НИИ);

б) производственный партнер заинтересован в предлагаемой тематике, возможно согласие на предоставление полигона для отработки экспериментального образца, дальнейший совместный бизнес-процесс определяется по текущей ситуации;

в) производственный партнер согласен разработать и изготовить экспериментальный образец при условии оплаты проведенных работ.

Специфика научных инновационных разработок в России заключается в том, что если разработка изначально иницируется не конечным заказчиком, а самим разработчиком (в нашем случае вузом), то действующие коммерческие предприятия готовы рассматривать научную разработку на поздних этапах жизненного цикла изделия, а именно в тот момент, когда имеются ОИС, ориентированные на рынок, и предсерийные образцы прошли испытания.

Поскольку у самого вуза нет производственной базы для создания опытных и предсерийных образцов как НТ, так и системы утилизации, целесообразно привлечение индустриального партнера (ИП) еще на этапе НИР. Взаимодействие с ИП может иметь нескольких возможных вариантов, а именно:

а) ИП заинтересован в производстве готовых изделий и готов на заключение лицензионных соглашений о возмездном предоставлении неисключительных прав;

б) ИП имеет техническую возможность и заинтересован в контрактном производстве серийных партий НТ и серийных образцов систем утилизации.

Прорабатываются как возможность сотрудничества, так и подготавливаются и согласовываются сопровождающие документы. Также на данном этапе необходимо разработать соответствующую техническую документацию. Проводится работа по по-

Этап научно-исследовательской работы жизненного цикла проекта в вузе

№ п/п	Перечень решаемых задач	Последовательность процессов проекта	Соответствующая нормативно-техническая и иная документация
Стадия создания			
Этап НИР			
1.	Формирование научного коллектива. Назначение руководителя проекта.	I. Процесс инициации проекта — формальное открытие проекта. II. Процесс планирования персонала проекта.	В организационной части: Устав вуза. В части управления проектом: [13—17].
2.	Анализ потребностей.	III. Процесс планирования содержания проекта.	В организационной части: имеющиеся нормативные и иные документы государственного, ведомственного уровня как основание для проведения НИОКР. В части управления проектом: [13—17]. В части НИР: [18].
3.	Определение целей, задач, результатов, рисков, участников, сроков, ресурсов, средств.	III. Процесс планирования содержания проекта. IV. Процесс разработки расписания.	В части управления проектом: [13—17].
4.	Утверждение концепции.	III. Процесс планирования содержания проекта.	В части управления проектом: [13—17].
5.	Проведение ПИП.	VII. Процесс организации исполнения проекта.	В части НИР: [18—19]. В части управления проектом: [13—17].
6.	Установление контактов со смежниками.	VII. Процесс организации исполнения проекта.	В части управления проектом: [13—17].
7.	Разработка содержания проекта: — ТЗ, КП; — формирование сметы и определение источника финансирования (участие в грантовых конкурсах, конкурсах РФНФ и иных / поиск индустриального партнера).	III. Процесс планирования содержания проекта. IV. Процесс разработки расписания. V. Процесс планирования бюджета проекта. VI. Процесс планирования закупок в проекте. VII. Процесс организации исполнения проекта.	В организационной части: в соответствии с существующим законодательством России или правилами фондов. В части НИР: [20]. В части управления проектом: [13—17].
8.	Декомпозиция проекта — разработка и согласование со смежниками договоров на выполнение СЧ НИР: — ТЗ, КП, график работ, смета.	VII. Процесс организации исполнения проекта. VIII. Процесс планирования обмена информацией в проекте.	В организационной части: в соответствии с существующим законодательством России. В части НИР: [20]. В части управления проектом: [13—17].
9.	Заключение договоров на выполнение СЧ НИР со смежниками.	VII. Процесс организации исполнения проекта. VIII. Процесс планирования обмена информацией в проекте.	В организационной части: в соответствии с существующим законодательством России. В части управления проектом: [13—17].
10.	Проведение теоретико-экспериментальных исследований.	VII. Процесс организации исполнения проекта. VIII. Процесс планирования обмена информацией в проекте. IX. Процесс планирования реагирования на риски. X. Процесс контроля исполнения проекта.	В части НИР: [18, 21, 22]. В части управления проектом: [13—17].
11.	Разработка программы обеспечения качества НИР.	VII. Процесс организации исполнения проекта.	В части управления проектом: [13—17].
12.	Правовая охрана создаваемых результатов интеллектуальной деятельности.	VII. Процесс организации исполнения проекта.	В организационной части: в порядке, установленном законодательством России. В части управления проектом: [13—17].
13.	Разработка ТЗ на выполнение аванпроекта (технического предложения).	VII. Процесс организации исполнения проекта. X. Процесс контроля исполнения проекта.	В части НИР: [23]. В части управления проектом: [13—17].

иску и привлечению к сотрудничеству КБ (КБ ИП) в качестве соисполнителей работ.

Далее в нашем случае возможны два варианта развития проекта. Первый вариант: коммерциализация проекта на текущем этапе путем отчуждения неисключительных прав на полученные в рамках проекта ОИС индустриальному партнеру на возмездной основе. Либо альтернативный второй вариант: создание малого инновационного предприятия на базе вуза. Если реализуется первый вариант, то на нем основной жизненный цикл данного проекта заканчивается после завершения процесса отчуждения. Вуз оставляет за собой возможность научно-технического сопровождения на стадии целевого применения, а также использования некоторых результатов интеллектуальной деятельности в своем образовательном процессе. Если же проект развивается по альтернативному сценарию и вуз в той или иной форме участвует в процессе производства и реализации готовой продукции, то, в свою очередь, возникают последующие этапы.

Организация производства и сбыта готовой продукции. На данном этапе мы рассматриваем несколько различных вариантов развития проекта путем:

а) организации предприятия собственными силами и на базе вуза путем создания коммерческого предприятия;

б) совместного предприятия с ИП с целью выпуска разработанной продукции;

в) контрактная сборка готовых изделий на оборудовании ИП и с последующей реализацией готовой продукции силами вуза. Подготовка к реализации данного этапа началась еще на первом этапе (НИР).

Мы рассматриваем тот путь развития проекта исходя из того, какие варианты мы сможем найти и проведем отбор исходя из лучших условий из тех для вуза, что будут нам предложены. Данный этап может отличаться способом проведения, но цель его будет одна — выпуск готовой продукции для конечных потребителей. Вуз оставляет за собой научно-техническое сопровождение при реализации вариантов а и б, в том числе обработку запросов и пожеланий конечных пользователей выпускаемой продукции. Еще на этапе НИР мы предусмотрели вариативность в разработке наших ОИС, для того чтобы в дальнейшем после эксплуатации образцов изделий вносить конструктивные изменения в материалы и устройства, чтобы покрыть изменяющиеся или вновь возникающие потребности конечных потребителей продукции. Стадия завершения проекта предусматривает проведение анализа опыта и определение направлений дальнейшего развития.

Очевидно, для обеспечения качественного управления проектом необходимо разработать, задокументировать и внедрить, автоматизировать (например, на базе широко известного продукта «1С») на уровне вуза единую систему управления проектами, но при этом учитывая вид проекта в соответствии с получаемым продуктовым результатом. На базе вуза могут реализовываться как образовательные проекты, так и научно-технические, опытные, технологические, инновационные проекты. Это позволит оперативно проводить перепланирование плана проекта и своевременно актуализировать его для своевременной реакции на отклонения в ходе выполнения проекта и обеспечения достоверной информацией.

Методические рекомендации по управлению рисками. Важной задачей является разработка методических рекомендаций по управлению рисками, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на качество процессов внутри научно-технического проекта. Идентификация рисков проводится для следующих целевых групп рисков:

а) риски для целей оперативного управления — это риски исполнительского уровня управления (в т.ч. структурные подразделения), присущие отдельным видам работ в рамках НИР и ОКР и обусловленные преимущественно факторами внутренней среды;

б) риски для целей принятия управленческих решений — это риски, которые требуют рассмотрения и принятия решения по их минимизации на уровне научного руководителя и руководства высшего звена. Данная группа рисков значительным образом влияет на достижение стратегических целей.

Классификация рисков представлена в следующем виде:

1. Внутренние технические риски — риски, связанные непосредственно с требованиями технического (тактико-технического) задания, а именно с:

- закупками и поставками;
- использованием экспериментального оборудования, комплектующих, материалов;
- проведением математического и физического моделирования;
- проведением проектных работ;
- выполнением опытно-конструкторских работ.

2. Внутренние нетехнические риски — риски, связанные с:

- отбором, управлением и квалификацией кадров (исполнителей проекта);
- выполнением руководством проекта анализа процессов на жизненном цикле проекта;
- поиском и формированием эффективной операции соисполнителей по проекту.

3. Внутренние юридические и контрактные риски — риски, связанные с:

- соответствием законодательным требованиям;
- правовой защищенностью объектов интеллектуальной собственности, а также с выполнением мероприятий по конфиденциальности;
- исполнением договорных обязательств соисполнителями работ.

4. Финансовые риски — риски, связанные с задержкой, сворачиванием, прекращением финансирования работ.

5. Экологические риски — риски, связанные с недопустимым воздействием на окружающую среду.

6. Внешние риски — риски, связанные с внешней политикой страны и ее стабильностью в экономике.

При идентификации риска учитывается и его значимость [24, 25].

В рамках рассматриваемых рекомендаций приводится перечень рисков при реализации проекта, в том числе на этапе НИР, а также ожидаемые последствия наступления рисков, мероприятия по предупреждению наступления рисков и действия в случае наступления рисков. Например, одним из внутренних юридических рисков рассматриваемого проекта является неисполнение договорных обязательств соисполнителей работ (исполнителей в рамках консорциума), что приводит к такому последствию наступления риска, как срыв сроков сдачи научно-технической продукции и воз-

врату денежных средств источнику финансирования. С целью предупреждения наступления данного риска должны проводиться со стороны головного исполнителя плановые периодические мониторинги выполнения договорных обязательств соисполнителями (исполнителями в рамках консорциума). Ответственным лицом выступает руководитель проекта. При наступлении риска руководитель проекта в праве обратиться к управленческим ресурсам высшего уровня. Вероятность возникновения описанного риска составляет 0,3, влияние риска — 0,9. Соответственно, оценка риска — 0,27, что говорит о необходимости его минимизации. Необходимо отметить, что мероприятия по предупреждению наступления риска должны быть отражены в календарном плане-графике работ по проекту.

С целью повышения качества исследований и снижения уровня технических рисков необходимо руководствоваться разработанной программой обеспечения качества НИР при реализации проекта. В которой отражены такие требования, например, как проведение верификации и валидации результатов, получаемых при физическом и математическом моделировании на этапах НИР [26], метрологическое обеспечение, обеспечение надежности, управление рисками проекта, защита информации и прочее.

Выводы

1. Проведенный информационный анализ показал необходимость разработки эффективной методики оценки качества процесса управления, направленной на получение прибыли при внедрении результатов интеллектуальной деятельности вуза в производство.

2. Исследован жизненный цикл проекта от научной идеи до конечного производства или продажи лицензии и выделен этап НИР, для которого рассматриваются предлагаемые рекомендации.

3. Сформулированы концептуальные основы, включающие в себя методические рекомендации последовательности действий и решений при управлении научно-техническим проектом на основе минимизации рисков.

4. Следующим этапом исследования является формирование системы ключевых показателей оценки качества процессов внутри проекта на этапе НИР.

Авторы выражают глубокую признательность за ценные советы д.т.н., профессору, профессору кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета Трушлякову Валерию Ивановичу.

Библиографический список

1. Об утверждении критериев отнесения товаров, работ и услуг к инновационной продукции и (или) высокотехнологичной продукции для целей формирования плана закупки такой продукции по отраслям, относящимся к установленной сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации: приказ Минпромторга РФ от 17.02.2020, № 521. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

2. Mäkinen E. I., Sapir A. Making Sense of Science, University, and Industry: Sensemaking Narratives of Finnish and Israeli Scientists // *Minerva*. 2023. No. 61 (4). P. 1–24. DOI: 10.1007/s11024-022-09485-6.

3. Sapir A. Brokering knowledge, monitoring compliance: technology transfer professionals on the boundary between academy and industry // *Journal of Higher Education*

Policy and Management. 2020. No. 43 (3). P. 1–16. DOI: 10.1080/1360080X.2020.1804657.

4. Kleinman D. L., Osley-Thomas R. Uneven Commercialization: Contradiction and Conflict in the Identity and Practices of American Universities // *Minerva*. 2014. No. 52. P. 1–26. DOI: 10.1007/s11024-014-9248-z.

5. Glenna L. L., Lacy W. B., Welsh R. [et al.]. University Administrators, Agricultural Biotechnology, and Academic Capitalism: Defining the Public Good to Promote University–Industry Relationships // *The Sociological Quarterly*. 2007. No. 48 (1). P. 141–163. DOI: 10.1111/j.1533-8525.2007.00074.x.

6. Дубицкая Е. А. Методические рекомендации по управлению инновационными проектами в высокотехнологичных отраслях // *Фундаментальные исследования*. 2019. № 1. С. 21–25. EDN: POLWJD.

7. Зернин Е. А., Томас К. И., Моисеенко М. В. Современные технологии управления проектами в научной и производственной сфере // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 2, ч. 2. С. 1–10. EDN: UICJKF.

8. Боярская Т. О. Стержневые клетки... практическое управление проектами в научно-производственном объединении // *Российское предпринимательство*. 2007. № 10. С. 111–115. EDN: IASNCD.

9. ГОСТ Р 58184-2018. Система менеджмента проектной деятельности. Основные положения. Введ. 01.12.2018. Москва: Стандартинформ, 2018. 11 с.

10. Пат. 2789048 Российская Федерация, МПК C08L 69/00, B01J 8/00. Способ синтеза состава полимерного композиционного материала для изготовления нефтепродуктовой тары с последующей утилизацией и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Русских Г. С., Давыдович Д. Ю., Фатеев П. Д. № 2021138922; заявл. 27.12.2021; опубл. 27.01.2023, Бюл. № 3.

11. Пат. 2824773 Российская Федерация, МПК F23G5/027, B09B3/00. Способ утилизации углеродсодержащего материала в автономной малогабаритной утилизационной модульной установке и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Федюхин А. В., Давыдович Д. Ю. № 2023132093; заявл. 06.12.2023; опубл. 13.08.2024, Бюл. № 23.

12. Ильц Д. Е., Федюхин А. В., Давыдович Д. Ю., Храпова Е. В., Бражникова К. А. Разработка малогабаритной мобильной утилизационной модульной установки, позволяющей утилизировать широкий вид отходов, с учетом экологических требований по воздействию на окружающую среду // Сб. работ лауреатов Междунар. конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2024 г. Москва: Мин-во энергетики Российской Федерации, ООО «Технологии развития», 2024. С. 27–30.

13. ГОСТ Р 54869-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом. Введ. 2012-09-01. Москва: Стандартинформ, 2019. 8 с.

14. ГОСТ Р ИСО 21500-2023. Управление проектами, программами и портфелями проектов. Контекст и основные понятия. Введ. 2024-06-01. Москва: Российский ин-т стандартизации, 2023. 11 с.

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

16. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Требования. Введ. 2022-01-01. Москва: Стандартинформ, 2021. 71 с.

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

18. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. Введ. 2018-07-01. Москва: Стандартинформ, 2018. 28 с.

19. ГОСТ Р 15.011-2022. Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. Введ. 2023-03-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.

20. ГОСТ РВ 0015.101-2010. Система разработки и постановки на производство. Военная техника. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение научно-исследовательских работ. Введ. 2012-01-01. Москва: Стандартинформ, 2011. 18 с.

21. ГОСТ РВ 15.105-2001. Система разработки и постановки на производство. Военная техника. Порядок выполнения научно-исследовательских работ и их составных частей. Основные положения. Введ. 2002-01-01. Москва: Госстандарт России, 2002. 35 с.

22. ГОСТ РВ 0015–110–2018. Система разработки и постановки на производство. Военная техника. Документация отчетная научно-техническая на научно-исследовательские работы, аванпроекты и опытно-конструкторские работы. Основные положения. Введ. 2019-12-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 31 с.

23. ГОСТ РВ 15.102-2004. Система разработки и постановки на производство. Военная техника. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение аванпроекта. Введ. 2006-01-01. М.: Стандартинформ, 2005. 23 с.

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

25. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. Введ. 2020-03-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 86 с.

26. Трушляков В. И., Бражникова К. А., Урбанский В. А. Метод улучшения качества теоретико-экспериментальных исследований при создании сложных технических систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 23, № 2. 2021. С. 17–28. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-2-17-28. EDN: ZZGKRH.

БРАЖНИКОВА Ксения Алексеевна, научный сотрудник НИЛ «Парогазовые смеси в конструкциях РН» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 689057

ORCID: 0000-0002-5393-9172

AuthorID (SCOPUS): 57192071067

Адрес для переписки: kabrazhnikova@omgtu.ru

ИЛЬЦ Денис Евгеньевич, аналитик НИЛ «Парогазовые смеси в конструкциях РН» ОмГТУ, г. Омск.

ORCID: 0009-0004-1624-1834

Адрес для переписки: deilts@omgtu.ru

Для цитирования

Бражникова К. А., Ильц Д. Е. Методические рекомендации оценки качества процесса управления научно-техническим проектом на этапе научных исследований на базе вуза // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 58–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-58-66.

Статья поступила в редакцию 17.09.2024 г.

© К. А. Бражникова, Д. Е. Ильц

METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR ASSESSING THE QUALITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PROJECT MANAGEMENT PROCESS AT THE SCIENTIFIC RESEARCH STAGE ON THE BASIS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTION

The research presents the analysis of the existing tools for ensuring the quality of the process of the scientific and technical projects management at all stages of the life cycle, implemented on the basis of higher education institution. The authors studied the life cycle of the project from the scientific idea to the final production or license sale and the stage of research and development, for which the proposed recommendations are considered. Moreover, the conceptual bases of the quality of scientific and technical project management process for the purpose of successful commercialization by the example of oil product container development are formed. Methodical recommendations on risk management of scientific and technical project are demonstrated.

The presented materials can be used in the development of methodological recommendations for assessing the quality of the management of scientific and technical project to obtain the appropriate economic effect.

Keywords: science and technology project, commercialization, quality, process, risks, management, life cycle, higher education institution.

References

1. Ob utverzhenii kriteriyev otneseniya tovarov, rabot i uslug k innovatsionnoy produktzii i (ili) vysokotekhnologichnoy produktzii dlya tseley formirovaniya plana zakupki takoy produktzii po otraslyam, otnosyashchimsya k ustanovlennoy sfere deyatel'nosti Ministerstva promyshlennosti i trgovli Rossiyskoy Federatsii: prikaz Minpromtorga RF ot 17.02.2020, № 521 [On approval of the criteria for attributing goods, works and services to innovative products and (or) high-tech products for the purposes of forming a plan for the purchase of such products in industries related to the established sphere of activity of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation]: order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation from 17.02.2020, No. 521. Available at Consultant Plus. (In Russ.).

2. Mäkinen E. I., Sapir A. Making Sense of Science, University, and Industry: Sensemaking Narratives of Finnish and Israeli Scientists // *Minerva*. 2023. No. 61 (4). P. 1–24. DOI: 10.1007/s11024-022-09485-6. (In Engl.).

3. Sapir A. Brokering knowledge, monitoring compliance: technology transfer professionals on the boundary between academy and industry // *Journal of Higher Education Policy and Management*. 2020. No. 43 (3). P. 1–16. DOI: 10.1080/1360080X.2020.1804657. (In Engl.).

4. Kleinman D. L., Osley-Thomas R. Uneven Commercialization: Contradiction and Conflict in the Identity and Practices of American Universities // *Minerva*. 2014. No. 52. P. 1–26. DOI: 10.1007/s11024-014-9248-z. (In Engl.).

5. Glenna L. L., Lacy W. B., Welsh R. [et al.]. University Administrators, Agricultural Biotechnology, and Academic Capitalism: Defining the Public Good to Promote University–Industry Relationships // *The Sociological Quarterly*. 2007. No. 48 (1). P. 141–163. DOI: 10.1111/j.1533-8525.2007.00074.x. (In Engl.).

6. Dubitskaya E. A. Metodicheskiye rekomendatsii po upravleniyu innovatsionnymi proyektami v vysokotekhnologichnykh otraslyakh [Methodological recommendations for the management of innovation projects in high-tech industries] // *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2019. No. 1. P. 21–25. EDN: POLWJD. (In Russ.).

7. Zernin E. A., Tomas K. I., Moiseyenko M. V. Sovremennyye tekhnologii upravleniya proyektami v nauchnoy i proizvodstvennoy sfere [Modern technology project management in the field of scientific and industrial] // *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering journal of Don*. 2015. No. 2, Part. 2. P. 1–10. EDN: UICJKF. (In Russ.).

8. Boyarskaya T. O. Sterzhnevyye kletki... prakticheskoye upravleniye proyektami v nauchno-proizvodstvennom ob'yedinenii [Practical management of development-and-manufacturing

projects] // Rossiyskoye predprinimatel'stvo. *Russian Journal of Entrepreneurship*. 2007. No. 10. P. 111–115. (In Russ.).

9. GOST R 58184–2018. Sistema menedzhmenta proyektnoy deyatel'nosti. Osnovnyye polozheniya [Project management system. Fundamentals]. Moscow, 2018. 11 p. (In Russ.).

10. Patent 2789048 Russian Federation, IPC C08L 69/00, B01J 8/00. Sposob sinteza sostava polimernogo kompozitsionnogo materiala dlya izgotovleniya nefteproduktovoy tary s posleduyushchey utilizatsiyey i ustroystvo dlya yego realizatsii [Method for the synthesis of polymer composite material formulation for the production of oil storage vessel with subsequent recycling and a device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Russkikh G. S., Davydovich D. Yu., Fateev P. D. No. 2021138922. (In Russ.).

11. Patent 2824773 Russian Federation, MPK F23G5/027, B09B3/00. Sposob utilizatsii uglerodsoderzhashchego materiala v avtonomnoy malogabaritnoy utilizatsionnoy modul'noy ustanovke i ustroystvo dlya yego realizatsii [Method of recycling carbon-containing material in self-contained small-size recycling modular plant and device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Fedyukhin A. V., Davydovich D. Yu. No. 2023132093. (In Russ.).

12. Ilts D. Ye., Fedyukhin A. V., Davydovich D. Yu., Khrapova E. V., Brazhnikova K. A. Razrabotka malogabaritnoy mobil'noy utilizatsionnoy modul'noy ustanovki, pozvolyayushchey utilizirovat' shirokiy vid otkhodov, s uchetom ekologicheskikh trebovaniy po vozdeystviyu na okruzhayushchuyu sredu [Development of a small-sized mobile recycling modular unit that allows recycling a wide range of waste, taking into account environmental requirements for environmental impact] // Sb. rabot laureatov Mezhdunar. konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlenykh na razvitiye i osvoyeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2024 g. *Collection of Works of Laureates of the International Competition of Scientific, Scientific-technical and Innovative Developments Aimed at the Development and Exploration of the Arctic and Continental Shelf 2024*. Moscow, 2024. P. 27–30. (In Russ.).

13. GOST R 54869–2011. Proyektnyy menedzhment. Trebovaniya k upravleniyu proyektom [Project management. Requirements for project management]. Moscow, 2019. 8 p. (In Russ.).

14. GOST R ISO 21500–2023. Upravleniye proyektami, programmami i portfelyami proyektov. Kontekst i osnovnyye ponyatiya [Project, program and project portfolio management. Context and concepts]. Moscow, 2023. 11 p. (In Russ.).

15. 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.).

16. GOST RV 0015-002-2020. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo voyennoy tekhniki. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [System for the development and launch of production of military equipment. Quality management systems. Requirements]. Moscow, 2021. 71 p. (In Russ.).

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

18. GOST 7.32–2017. Sistema standartov po informatsii, biblioteknomu i izdatel'skomu delu. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote. Struktura i pravila oformleniya [System of standards on information, librarianship and publishing. The research report. Structure and rules of presentation]. Moscow, 2018. 28 p. (In Russ.).

19. GOST R 15.011–2022. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Patentnyye issledovaniya. Soderzhaniye i poryadok provedeniya [System of product development and installation for production. Patent research. Content and procedure]. Moscow, 2022. 16 p. (In Russ.).

20. GOST RV 0015.101–2010. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo. Voyennaya tekhnika. Taktiko-tekhnicheskoye

(tekhnicheskoye) zadaniye na vypolneniye nauchno-issledovatel'skikh rabot [Development and production launch system. Military equipment. Tactical and technical (technical) assignment for the implementation of research and development work]. Moscow, 2011. 18 p. (In Russ.).

21. GOST RV 15.105–2001. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo. Voyennaya tekhnika. Poryadok vypolneniya nauchno-issledovatel'skikh rabot i ikh sostavnykh chastey. Osnovnyye polozheniya [System of development and putting into production. Military equipment. Procedure for performing research and development work and its components. Fundamentals]. Moscow, 2002. 35 p. (In Russ.).

22. GOST RV 0015.110–2018. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo. Voyennaya tekhnika. Dokumentatsiya otchetnaya nauchno-tekhnicheskaya na nauchno-issledovatel'skiye raboty, avanproyekty i opytно-konstruktorskiye raboty. Osnovnyye polozheniya [Development and production launch system. Military equipment. Scientific and technical reporting documentation for research and development work, preliminary designs, and experimental design work. Basic provisions]. Moscow, 2021. 31 p. (In Russ.).

23. GOST RV 15.102–2004. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo. Voyennaya tekhnika. Taktiko-tekhnicheskoye (tekhnicheskoye) zadaniye na vypolneniye avanproyekta [Development and production launch system. Military equipment. Tactical and technical (technical) assignment for the implementation of the preliminary design]. Moscow, 2005. 23 p. (In Russ.).

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

25. GOST R 58771–2019. Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska [Risk management. Risk assessment technologies]. Moscow, 2020. 86 p. (In Russ.).

26. Trushlyakov V. I., Brazhnikova K. A., Urbansky V. A. Metod uluchsheniya kachestva teoretiko-eksperimental'nykh issledovaniy pri sozdaniy slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Method of improving the quality of theoretical and experimental research at the stage of development complex technical system] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. Vol. 23, no. 2. 2021. P. 17–28. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-2-17-28. EDN: ZZGKRH. (In Russ.).

BRAZHNIKOVA Kseniya Alekseevna, Researcher at the Scientific Research Laboratory «Steam-Gas Mixtures in Launch Vehicle Designs» Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

AuthorID (RSCI): 689057

ORCID: 0000-0002-5393-9172

AuthorID (SCOPUS): 57192071067

Correspondence address: kabrazhnikova@omgtu.ru

ILTS Denis Evgenevich, Analyst at the Scientific Research Laboratory «Steam-Gas Mixtures in Launch Vehicle Designs» OmSTU, Omsk.

ORCID: 0009-0004-1624-1834

Correspondence address: deilts@omgtu.ru

For citations

Brazhnikova K. A., Ilts D. E. Methodological recommendations for assessing the quality of science and technology project management process at the scientific research stage on the basis of higher education institution // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 58–66. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-58-66.

Received September 17, 2024.

© K. A. Brazhnikova, D. E. Ilts

УДК 621.316.11
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-67-75
EDN: YGWBGL

М. Я. КЛЕЦЕЛЬ¹
Е. В. ПЕТРОВА²
С. С. ГИРШИН²
В. А. КРИВОЛАПОВ²
В. Н. ГОРЮНОВ²
В. М. ТРОЦЕНКО²

¹НАО «Торайгыров университет»,
г. Павлодар,
Республика Казахстан

²Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Эффективное и устойчивое функционирование энергосистем является критически важным элементом для обеспечения поставки электроэнергии, необходимой для поддержания жизненных функций современного общества. В этом контексте интеграция метеорологических данных в управление электрическими сетями приобретает все большее значение.

Метеорологические данные, такие как информация о погодных условиях, температуре, ветре и осадках, играют существенную роль в оперативном и стратегическом управлении энергосистемами. Их использование позволяет оптимизировать работу генерирующих и распределительных станций, использовать максимальную пропускную способность линий, а также улучшать планирование ремонтных работ и обновление инфраструктуры. Зная погодные условия, операторы электроэнергетических сетей могут принимать более обоснованные решения относительно распределения и управления энергоресурсами.

Данное исследование направлено на определение роли метеорологических данных в стратегиях управления современных энергетических систем.

Ключевые слова: температура провода, долгосрочное планирование, электрические сети, эффективность энергосистем, энергосбережение, воздушные линии электропередачи.

Введение. Электричество станет основным энергоносителем, на долю которого к 2050 году будет приходиться более 50 % от общего конечного потребления энергии [1]. Это напрямую связано с ростом благосостояния в странах с формирующейся рыночной экономикой и растущей электрификацией глобальной энергетической системы [2]. Согласно прогнозам Global Energy Outlook 2023 [3], к 2050 году предполагается увеличение мирового спроса на электроэнергию от 62 до 185 процентов по сравнению с уровнем 2021 года. Электрические сети тут играют ключевую роль в обеспечении энергии. К 2050 году будет добавлено более 45 миллионов километров распределительных линий и еще 4 миллиона километров линий электропередач вместе с основным оборудованием, силовыми трансформаторами и сопутствующим оборудованием управления и защиты, что увеличит существующую сеть более чем на 80 % [4].

По мере увеличения спроса на электроэнергию и установки новых генераторов требуются линии электропередачи для транспортировки все большего количества энергии. Большой объем производства энергии приводит к высокой передаваемой мощности по линиям, в результате чего они работают вблизи установленных пределов допустимой нагрузки или за их пределами [5]. Дальнейшее расширение системы невозможно без ее модернизации [6, с. 1]. Строительство новых линий или модернизация существующих — чрезвычайно дорогостоящий процесс, который требует не только крупных инвестиций, но и приводит к перебоям в обслуживании потребителей и дополнительным издержкам для производителей.

Следовательно, необходимо пересмотреть традиционную политику эксплуатации линий электропередачи для поддержания оптимального управления линиями.

Причины повышения температуры. Ограничение пропускной способности в первую очередь связано с тепловыми свойствами проводника [6, с. 1].

Основные факторы, которые способствуют повышению температуры воздушных линий (ВЛ) и создают нежелательное воздействие на проводники ВЛ:

- перегрузки;
- короткие замыкания;
- погодные условия.

Основные погодные параметры, влияющие на длительно допустимый ток I_{amp} (А), включают температуру окружающей среды T_a (°С), солнечную радиацию Q_s (Вт/м²), скорость ветра V_w (м/с) и направление ветра ϕ (градус). В [7] произведен расчет проводника ACSR 240/30, определяющий диапазон изменения длительно допустимых токов под влиянием перечисленных факторов: 1) Q_s : 788–882 А; 2) ϕ : 766–902 А; 3) T_a : 722–1024 А; 4) V_w : 617–1146 А.

Влияние повышенной температуры. Срок службы проводника измеряется десятилетиями, однако, если он эксплуатируется при температуре, превышающей расчетную, проводник может выйти из строя раньше запланированного срока службы [8]. Повышенная температура также вызывает расширение металла и повышенный прогиб на участке линии электропередачи. При строительстве линии электропередачи предполагается определенное расстояние между проводником и другим объектом, обеспечивающим возможность провисания. Однако, если проводник прогнется ниже установленного предела, он может соприкоснуться с посторонни-

ми предметами, что может привести к вредным последствиям для самой линии или для близлежащего имущества. В худшем случае это может привести к травмам или смерти человека.

Управление электрическими сетями с учетом погодных изменений. По причинам, указанным выше, крайне важно тщательно контролировать количество передаваемой мощности, чтобы убедиться, что температура линии не превышает установленные пределы. Исторически сложилось так, что энергетические компании эксплуатировали свое оборудование консервативно, имея значительный запас прочности для преодоления непредвиденных обстоятельств. В идеале пропускная способность линии электропередачи намного превышает требуемую, и не нужно уделять никакого особого внимания сети. Но для этого необходимо глобально модернизировать существующие электрические сети. Однако для решения проблемы в краткосрочной перспективе нужны новые технологические решения.

Обеспечить решение проблемы при меньших затратах может «Динамическая тепловая оценка» (ДТО). Точное определение температуры линии в режиме реального времени при различных условиях окружающей среды может привести к безопасному увеличению передаваемой мощности по линии.

Прямые методы оценки линии основаны на прямом измерении характеристик линии электропередачи, таких как температура проводника, натяжение линии и провисание проводника. Прямой мониторинг проводников, как правило, обеспечивает высокую точность, но сопряжен с затратами на установку и техническое обслуживание, связанными с адекватным охватом всех пролетов линии. Безусловно, наилучшим подходом было бы контролировать каждый отрезок линии, но это привело бы к высоким затратам в случае длинных линий.

Иной подход использует тепловую модель, основанную на метеорологических данных без каких-либо полевых измерений для оценки рейтинга линии. Измеренные или прогнозируемые метеорологические данные рассматриваются в качестве основных входных данных. Устройства для мониторинга погоды считаются самым простым в реализации методом, поскольку нет необходимости устанавливать приборы на самой линии. В моделях оценки мощности линий, основанных на погодных условиях, по сравнению с прямыми методами, при оценке мощности присутствует большая неопределенность, поскольку температура линии и мощность определяются косвенно с помощью теоретических моделей и расчетов. Этот метод, очевидно, дешевле и проще в реализации, но вносит неопределенность, так что следует учитывать соответствующие погрешности в результатах. Основным принципом расчета теплопроводности с учетом погодных условий является IEEE 738 [9] и CIGRE 601 (обновленная версия CIGRE 207) [10]. Компания ПАО «ФСК ЕЭС» разработала свой стандарт расчета СТО 56947007-29.240.55.143-2013 [11].

ДТО обеспечивает более точную оценку линии, поскольку использует системы слежения в реальном времени, установленные непосредственно на проводнике или близлежащих метеостанциях, для измерения пропускной способности линии на основе изменений метеорологических переменных. Работа системы на базе ДТО обеспечивает стабильную температуру проводника и допустимый провес линии [12]. Диспетчеры будут использовать

эти данные для оценки пропускной способности воздушной линии.

Для ввода ДТО в эксплуатацию в систему необходимо интегрировать несколько различных технологических компонентов помимо измерительного оборудования. Для своевременной передачи данных между измерительным устройством и аналитическим модулем должен быть установлен канал связи. В качестве каналов связи можно использовать множество различных технологий — радио, сотовые сети, спутниковую связь и т. д.

Универсальный метод расчета. Уравнение теплового баланса IEEE 738:

$$q_c + q_r = q_s + PR(T_c), \quad (1)$$

где q_c — конвекционные тепловые потери; q_r — потери за счет теплового излучения; q_s — теплота от солнечного излучения; I — сила тока в проводнике; T_c — температура проводника; $R(T_c)$ — сопротивление провода при температуре T_c .

Уравнение теплового баланса IEEE 738 для анализа переходных процессов:

$$q_c + q_r + mC_p(dT_c/dt) = q_s + PR(T_c), \quad (2)$$

где mC_p — общая теплоемкость провода.

Несмотря на теоретическую перспективу обеспечить более точную оценку с использованием расчетов для переходных процессов, на практике это представляет собой крайне сложную задачу. Помимо трудностей, связанных со сбором и обработкой данных, необходимо уделить внимание их сохранности и целостности. Следует учитывать, что расчеты переходных процессов могут быть чувствительны к изменениям в начальных данных и параметрах, что требует более тщательного контроля над их точностью и актуальностью. Кроме того, внедрение расчетов переходных процессов существенно увеличит объем необходимых финансовых ресурсов. Это связано с требованиями к вычислительным ресурсам и специализированному оборудованию.

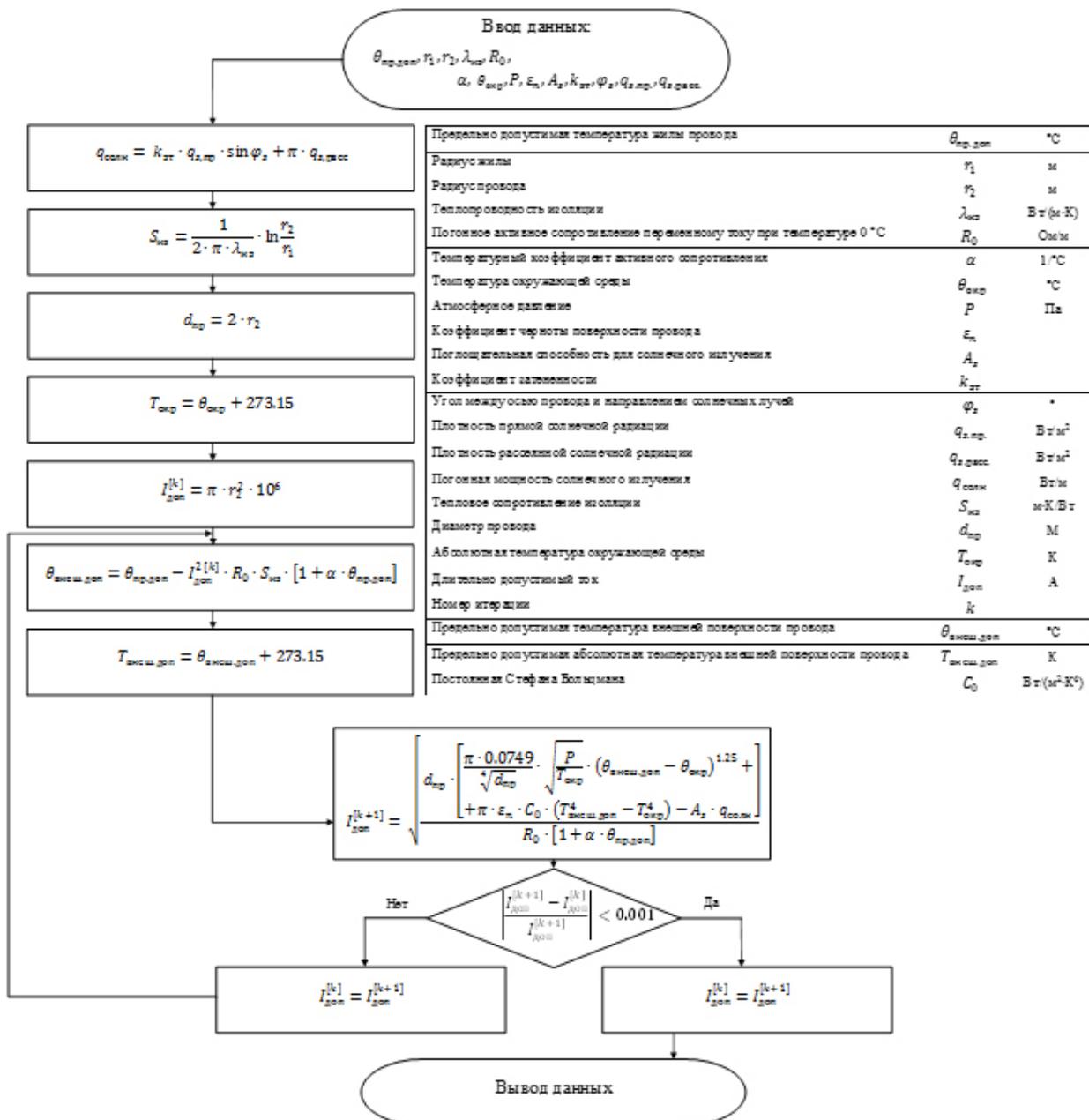


Рис. 1. Алгоритм расчета длительно допустимого тока для естественной конвекции

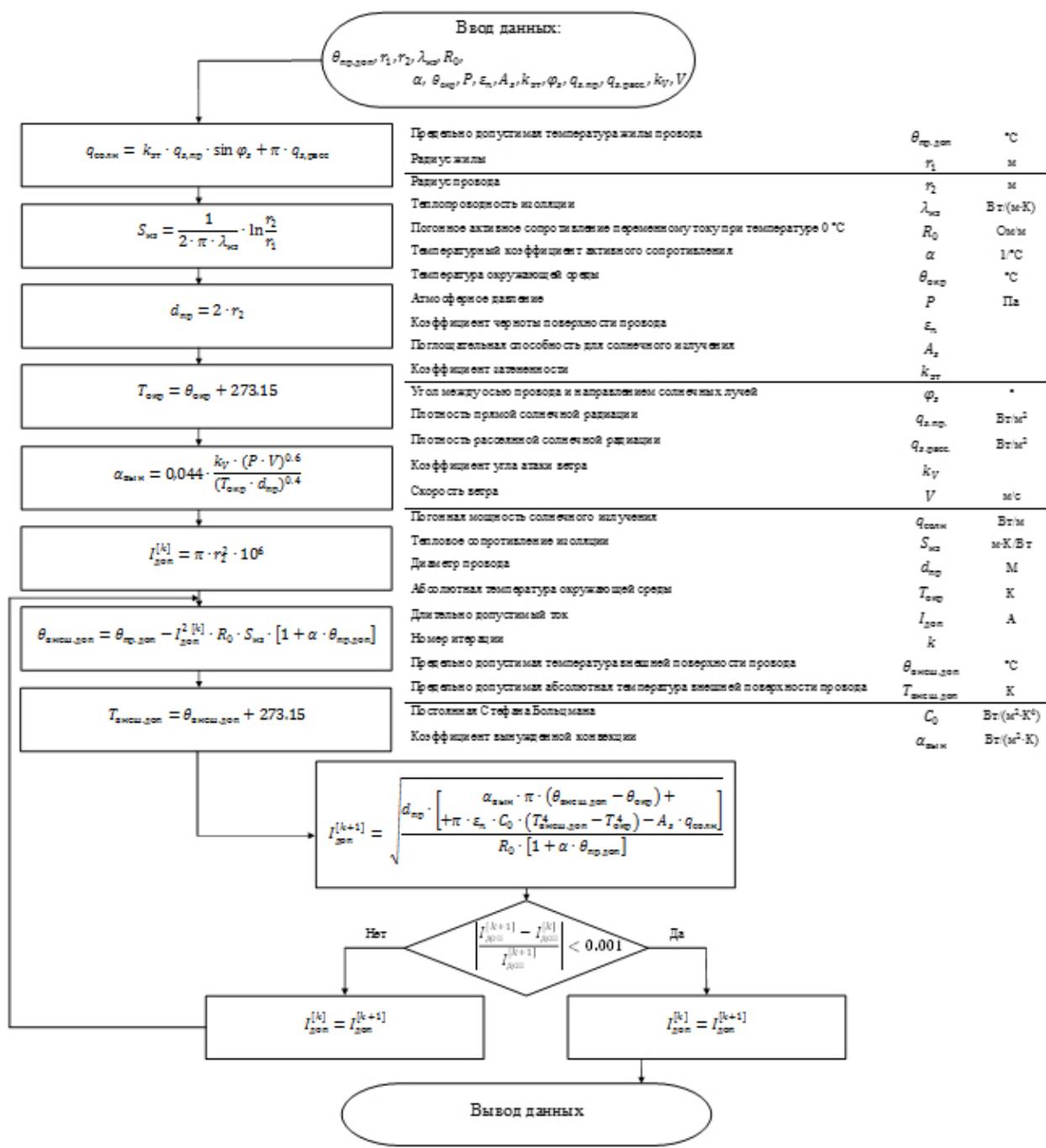


Рис. 2. Алгоритм расчета длительно допустимого тока для вынужденной конвекции

дованию, что потребует дополнительных финансовых инвестиций. Поэтому на практике инженеры и операторы электросетей могут использовать упрощенные модели и методы для более быстрой и допустимой оценки ДТО.

Основное важное соображение — это баланс между точностью и практичностью. В итоге, решение о внедрении расчетов переходных процессов для теплового баланса IEEE 738 должно быть тщательно обдумано с учетом всех вышеуказанных факторов, чтобы убедиться, что польза от более точных оценок будет оправдывать все затраты и сложности, связанные с этим подходом.

Существующие методы ограничены в применении к современным самонесущим проводам. Представленный ниже метод является универсальным и может быть использован для расчета традиционных проводов, высокотемпературных проводов

и самонесущих проводов [13]. На рис. 1 и рис. 2 изображены алгоритмы, используемые для определения длительно допустимого тока на основе данного метода при условиях как естественной, так и вынужденной конвекции. Эти алгоритмы используют итерационное приближение для поиска искомого значения.

Для иллюстрации расчетов возьмем почасовой прогноз погоды для города Омска с веб-сайта «<https://ru-meteo.ru/omsk/hour>», датированный 31 октября 2023 года, и произведем оценку длительно допустимого тока на протяжении 24 часов. Информация, предоставленная метеорологическим ресурсом, представлена в табл. 1.

В качестве данных для расчетов провода АС-240/32 используются следующие параметры:

— погонное активное сопротивление переменному току при температуре 20 °C: 0,118 Ом/км;

Таблица 1

Прогноз погоды в Омске на 31.10.2023

Час	Атмосферное давление, мм рт.ст.	Скорость ветра, м/с	Направление ветра	Температура окружающей среды, гр.	Облачность
0	755	4,9	Западное	-2,9	Да
1		4,7		-3	
2		4,8		-3,1	
3		4,7		-3,1	
4	754	4,6	Юго-Западное	-3,3	
5		4,6		-3,5	
6		4,5		-3,8	
7		4,4		-4	
8		4,5		-4,2	
9		4,5		-4,3	
10		4,4		-4,2	
11		4,2		-4	
12	753	3,8	Южное	-3,6	
13		3,4		-3,2	
14		3,2		-3	
15		3,1		-3,3	
16		2,9		-5,8	
17		2,3		-7,5	
18		3		-6,9	
19	754	3,1	Юго-Западное	-7,7	
20		3		-8	
21		3		-8,2	
22		2,8		-6,9	
23		2,6		-6,9	

- температурный коэффициент электрического сопротивления: $0,0043 \text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- диаметр провода: $0,0216 \text{ м}$;
- коэффициент затененности: $0,7$;
- коэффициент черноты поверхности провода: $0,6$;
- поглощательная способность провода для солнечной изоляции: $0,6$;
- предельно допустимая температура провода: $70 \text{ }^\circ\text{C}$;

— коэффициент угла атаки ветра при западном направлении ветра примем: 1 , при южном: $0,5$, при юго-западном: $0,75$;

— плотность потока солнечной радиации по условиям облачности принята равной нулю.

Полученные результаты вычислений приведены на рис. 3. Этот пример расчета длительно допустимого тока иллюстрирует, как метеорологические данные могут быть использованы для оценки длительно допустимого тока в условиях переменной погоды. Диапазон длительно допустимого тока варьируется в пределах от $893,79 \text{ А}$ до $1455,6 \text{ А}$.

Экономические перспективы. Основным преимуществом ДТО является экономия средств, связанная с использованием существующего оборудования для передачи большего количества энергии, что позволяет более эффективно использовать имеющиеся ресурсы и одновременно предлагает недорогую альтернативу затратам миллионов долларов на модернизацию линий.

Использование ДТО может обеспечить экономическую безопасность. Обычно ДТО предоставляет пределы, превышающие статические сезонные (более 95% расчетных значений в опыте Terna), но можно также обнаружить случаи более низкого рейтинга из-за очень неблагоприятных условий окружающей среды [14].

Чтобы рассчитать конечную стоимость, необходимо принять во внимание преимущества, достигнутые от внедрения ДТО, такие как отсрочка строительства линии электропередачи и дополнительная пропускная способность, что может привести к значительной экономии. Прогнозировать точную экономическую выгоду, связанную со снижением затрат, сложно, поскольку будущие метеорологические условия и потоки нагрузки не будут известны с уверенностью до тех пор, пока они не произойдут. Однако обоснованная оценка может быть произведена путем изучения снижением затрат в разные периоды времени и в разных местностях различных электросетевых компаний.

В [15] описывают, что использование ДТО обеспечивает необходимую пропускную способность, позволяющую сети безопасно функционировать даже тогда, когда сеть работает почти на полную мощность. Без ДТО алгоритм планирования не смог найти решение из-за нарушения ограничений в определенных случаях. В [16] представлена положительная корреляция между мощностью ветра и ДТО. Анализ потенциальной экономической выгоды, полученной от применения ДТО к линиям электропередачи, соединяющему сибирскую и ев-

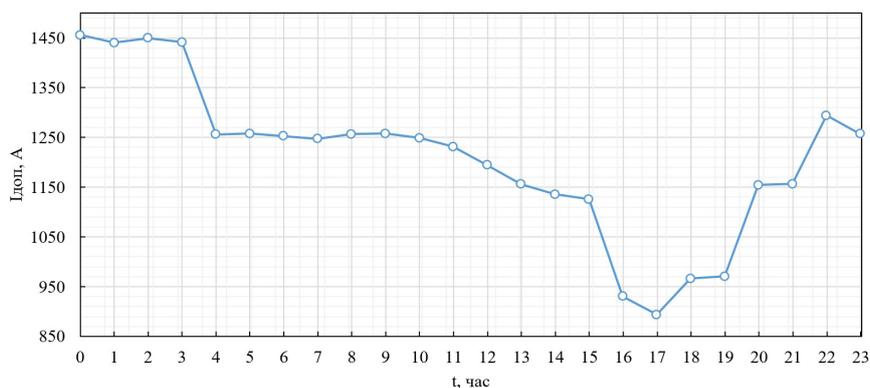


Рис. 3. Результаты расчета на сутки вперед

ропейскую зону России, был проведен в [17]. Был сделан вывод, что можно сэкономить до 8 % затрат, транспортируя больше дешевой сибирской энергии в европейскую зону с использованием ДТО. В [18] представлено исследование, в котором был сделан вывод, что применение ДТО на линии в Южной Альберте (Канада) может увеличить средний рейтинг на 22 %. В [19, с. 601] результаты иллюстрируют, что увеличение пропускной способности линии на 5–10 % по сравнению со статическим пределом может помочь уменьшить перегрузки на линиях электропередачи. В [20] ДТО обеспечил повышенную ситуационную осведомленность для более чем 450 миль линий электропередачи в очень сложной местности.

Ограничения. Несмотря на потенциал ДТО для достижения экономии средств и его способность повышать надежность и отказоустойчивость электросетей, широкому внедрению препятствуют несколько барьеров и ограничений. В целом, энергетическая отрасль в значительной степени не склонна к риску с внедрением новых технологий.

Многие энергетические компании могут не применять ДТО, поскольку они больше озабочены безопасностью и надежностью системы, а не экономией. Кроме того, для линий электропередачи с незначительной нагрузкой системные операторы могут не считать полезными динамические характеристики [19, с. 607].

Линии электропередачи обычно пересекают большие территории и охватывают несколько погодных регионов, которые по-разному влияют на показатели линий. Следовательно, пропускная способность и удлинение проводника обычно неодинаковы по всей линии электропередачи. Безопасная практика заключается в том, чтобы использовать самый горячий отрезок линии или тот отрезок линии, который вытянулся и провис больше всего. Определение критических пролетов гарантирует, что все участки линии всегда будут обладать достаточной тепловой мощностью для соответствия используемому номиналу линии. Определение этих промежутков не является простой задачей и влияет на стоимость внедрения ДТО.

Системы ДТО также могут полностью или частично выходить из строя, например, при потере связи. Ошибки моделирования включают неточные математические модели оценки, ошибки прогнозирования погоды. Например, в старых линиях электропередачи тепловые и механические свойства проводника могли со временем измениться из-за старения и использования в прошлом, что привело к неточным результатам при расчетах.

ДТО линии также сопряжен с рядом рисков при резком изменении погодных факторов. Например, если запланирована работа линии электропередачи на максимально возможно передаваемой мощности из-за прогноза сильных ветров, но изменение погоды вызывает внезапное падение скорости ветра в режиме реального времени, тогда линия будет работать выше своего фактического теплового предела. В этой ситуации существует повышенный риск нарушения высота провеса или, в крайних случаях, нагрева до такой степени, что материал и механические свойства линии электропередачи постоянно ухудшаются.

Интеграция в диспетчерскую систему управления является также сложным этапом внедрения ДТО, поскольку добавление дополнительной информации в диспетчерскую может чрезмерно обре-

менить операторов. В дополнение к этому процессу необходимо дополнительное обучение сотрудников.

Кибербезопасность вызывает растущую озабоченность в электроэнергетике; добавление новых технологий, коммуникационного оборудования и компьютеров для обработки данных увеличивает площадь кибератак.

Заключение. Интеграция метеорологических данных в энергосистемы имеет огромный потенциал для улучшения эффективности, надежности и устойчивости энергоснабжения. Она позволяет оперативно реагировать на изменчивость погоды и адаптировать стратегии управления сетями под текущие погодные условия. Это особенно важно в контексте растущего потребления электроэнергии во всем мире. Путем анализа данных о погоде и электропотреблении, а также с использованием современных методов моделирования и оптимизации можно достичь значительных экономических выгод. Однако следует отметить, что успешная интеграция метеорологических данных требует совместных усилий со стороны энергетических компаний, метеорологических служб, исследовательских учреждений и государственных органов. Экономические выгоды этого подхода могут быть значительными, а реализация будет способствовать более устойчивой и экономически эффективной энергетике в будущем.

В настоящее время Россия отстает от других стран во внедрении этих технологий. Тем не менее компания ПАО «Россети» в новой редакции положения «О единой технической политике в электросетевом комплексе» [21] ставит одну из ключевых задач «применение систем диагностирования технического состояния ВЛ под рабочим напряжением без вывода из работы», что говорит о заинтересованности в этом направлении.

Результаты данной работы могут стать основой для дальнейших исследований для практической реализации интеграции метеорологических данных в управление электрическими сетями.

Библиографический список

1. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway // International Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023> (дата обращения: 05.11.2023).
2. bp Energy Outlook 2023 // BP. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf> (дата обращения: 05.11.2023).
3. Global Energy Outlook 2023: Sowing the Seeds of an Energy Transition // Resources for the Future. URL: <https://www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2023> (дата обращения: 05.11.2023).
4. World Energy Outlook 2022 // International Energy Agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (дата обращения: 05.11.2023).
5. Paldino G. M., De Caro De F., De Stefani J. [et al.]. A Digital Twin Approach for Improving Estimation Accuracy in Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 6. P. 2254. DOI: 10.3390/en15062254.
6. Barton T., Musilek P. Day-Ahead Dynamic Thermal Line Rating Using Numerical Weather Prediction // 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE). 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/CCECE.2019.8861883.
7. Liu Z., Deng H., Peng R. [et al.]. An Equivalent Heat Transfer Model Instead of Wind Speed Measuring for Dynamic

Thermal Rating of Transmission Lines // *Energies*. 2020. Vol. 13, № 18. P. 4679. DOI: 10.3390/en13184679.

8. Barton T. Forecasting of Dynamic Thermal Line Rating Under the Conditions of Temporal Discretization and Correlation: Thesis. Canada, 2021. 127 p. DOI: 10.7939/r3-hjji-9269.

9. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors // IEEE. 2013. P. 1–72. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858.

10. Guide for thermal rating calculations of overhead lines // CIGRE. 2014. 95 p.

11. СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. Стандарт организации. Введ. 2013–02–13. Москва: ОАО ФСК ЕЭС, 2013. 42 с.

12. Morteza A., Sadipour M., Fard R. S. [et al.]. A dagging-based deep learning framework for transmission line flexibility assessment // *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1049/rpg2.12663.

13. Петрова Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи // *Известия Транссиба*. 2019. № 3 (39). С. 134–145. EDN: LDQZUC.

14. Massaro F., Ippolito M. G., Carlini E. M. [et al.]. Maximizing energy transfer and RES integration using dynamic thermal rating: Italian TSO experience // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 174. P. 105864. DOI: 10.1016/j.epr.2019.105864.

15. Dabbaghjamesh M., Kavousi-Fard A., Mehraeen S. Effective Scheduling of Reconfigurable Microgrids with Dynamic Thermal Line Rating // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66, no. 2. P. 1552–1564. DOI: 10.1109/TIE.2018.2827978.

16. Viafora N., Delikaraoglou S., Pinson P. [et al.]. Chance-constrained optimal power flow with non-parametric probability distributions of dynamic line ratings // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 114. P. 105389. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105389.

17. Bubenchikov K., Gonzalez-Castellanos A., Pozo D. Benefits of Dynamic Line Rating for the Russian Power Corridor between the European and Siberian Zones // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059177.

18. Bhattarai B. P., Gentle J. P., McJunkin T. [et al.]. Improvement of Transmission Line Ampacity Utilization by Weather-Based Dynamic Line Rating // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. Vol. 33, no. 4. P. 1853–1863. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2798411.

19. Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 600–612. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001.

20. Abboud A. W., Gentle J. P., McJunkin T. R. [et al.]. Using Computational Fluid Dynamics of Wind Simulations Coupled with Weather Data to Calculate Dynamic Line Ratings // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 35, no. 2. P. 745–753. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2925520.

21. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция) //

ПАО «Россети». 2022. URL: [https://rosseti-yug.ru/upload/iblock/04b/Положение%20о%20единой%20технической%20политике%20ПАО%20Россети%20\(ред.492\).pdf](https://rosseti-yug.ru/upload/iblock/04b/Положение%20о%20единой%20технической%20политике%20ПАО%20Россети%20(ред.492).pdf) (дата обращения: 05.11.2023).

КЛЕЦЕЛЬ Марк Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика» НАО «Торайгыров университет», г. Павлодар, Республика Казахстан.

SPIN-код: 7986-1196

AuthorID (РИНЦ): 498610

Адрес для переписки: mkletsel@mail.ru

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapov_vladislav@mail.ru

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

Для цитирования

Клецель М. Я., Петрова Е. В., Гиршин С. С., Криволапов В. А., Горюнов В. Н., Троценко В. М. Повышение пропускной способности электрических сетей на основе интеграции метеорологических данных // *Омский научный вестник*. 2024. № 4 (192). С. 67–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-67-75.

Статья поступила в редакцию 21.12.2023 г.

© М. Я. Клецель, Е. В. Петрова, С. С. Гиршин,

В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко

INCREASING THE CAPACITY OF ELECTRIC GRIDS BASED ON THE INTEGRATION OF METEOROLOGICAL DATA

The efficient and sustainable functioning of energy systems is a critical element for supplying of electricity necessary to maintain the vital functions of modern society. Therefore, the integration of meteorological data into the management of electrical grids is becoming increasingly important.

Meteorological data, such as information on weather conditions, temperature, wind and precipitation, play an essential role in the operational and strategic management of power systems. Their use allows optimizing the operation of generating and distribution stations, using the maximum capacity of lines, as well as improve the planning of repair work and infrastructure upgrades. On the basis of the weather conditions, operators of electric power grids can make more informed decisions regarding the distribution and management of energy resources.

The research is aimed at determining the role of meteorological data in the management strategies of modern energy systems.

Keywords: wire temperature, long-term planning, electric grids, efficiency of power systems, energy saving, overhead power transmission lines.

References

1. P World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway // International Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023> (accessed: 05.11.2023). (In Engl.).
2. bp Energy Outlook 2023 // BP. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf> (accessed: 05.11.2023). (In Engl.).
3. Global Energy Outlook 2023: Sowing the Seeds of an Energy Transition // Resources for the Future. URL: <https://www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2023> (accessed: 05.11.2023). (In Engl.).
4. World Energy Outlook 2022 // International Energy Agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (accessed: 05.11.2023). (In Engl.).
5. Paldino G. M., De Caro F., De Stefani J. [et al.]. A Digital Twin Approach for Improving Estimation Accuracy in Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines // *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 6. P. 2254. DOI: 10.3390/en15062254. (In Engl.).
6. Barton T., Musilek P. Day-Ahead Dynamic Thermal Line Rating Using Numerical Weather Prediction // 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE). 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/CCECE.2019.8861883. (In Engl.).
7. Liu Z., Deng H., Peng R. [et al.]. An Equivalent Heat Transfer Model Instead of Wind Speed Measuring for Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 18. P. 4679. DOI: 10.3390/en13184679. (In Engl.).
8. Barton T. Forecasting of Dynamic Thermal Line Rating Under the Conditions of Temporal Discretization and Correlation: Thesis. Canada, 2021. 127 p. DOI: 10.7939/r3-hjjj-9269. (In Engl.).
9. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors // IEEE. 2013. P. 1–72. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858. (In Engl.).
10. Guide for thermal rating calculations of overhead lines // CIGRE. 2014. 95 p. (In Engl.).
11. STO 56947007-29.240.55.143-2013. Metodika rascheta predel'nykh tokovykh nagruzok po usloviyam sokhraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimyykh gabaritov vozdushnykh liniy: Standart organizatsii [Methodology for calculating maximum current loads under the conditions of maintaining the mechanical strength of wires and permissible dimensions of overhead lines. Organisation Standard]. Moscow, 2013. 42 p. (In Russ.).
12. Morteza A., Sadipour M., Fard R. S. [et al.]. A dagging-based deep learning framework for transmission line flexibility assessment // *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1049/rpg2.12663. (In Engl.).
13. Petrova E. V. Otsenka vliyaniya solnechnoy radiatsii na nagruzochnyye poteri aktivnoy moshchnosti v vysoko-

temperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh liniy elektropredachi [Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines] // *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 3 (39). P. 134–145. EDN: LDQZUC. (In Russ.).

14. Massaro F., Ippolito M. G., Carlini E. M. [et al.]. Maximizing energy transfer and RES integration using dynamic thermal rating: Italian TSO experience // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 174. P. 105864. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.105864. (In Engl.).

15. Dabbaghjamanesh M., Kavousi-Fard A., Mehraeen S. Effective Scheduling of Reconfigurable Microgrids with Dynamic Thermal Line Rating // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 66, no. 2. P. 1552–1564. DOI: 10.1109/TIE.2018.2827978. (In Engl.).

16. Viafora N., Delikaraoglou S., Pinson P. [et al.]. Chance-constrained optimal power flow with non-parametric probability distributions of dynamic line ratings // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 114. P. 105389. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105389. (In Engl.).

17. Bubenchikov K., Gonzalez-Castellanos A., Pozo D. Benefits of Dynamic Line Rating for the Russian Power Corridor between the European and Siberian Zones // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059177. (In Engl.).

18. Bhattarai B. P., Gentle J. P., McJunkin T. [et al.]. Improvement of Transmission Line Ampacity Utilization by Weather-Based Dynamic Line Rating // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. Vol. 33, no. 4. P. 1853–1863. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2798411. (In Engl.).

19. Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 600–612. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001. (In Engl.).

20. Abboud A. W., Gentle J. P., McJunkin T. R. [et al.]. Using Computational Fluid Dynamics of Wind Simulations Coupled with Weather Data to Calculate Dynamic Line Ratings // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 35, no. 2. P. 745–753. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2925520. (In Engl.).

21. Polozheniye PAO «Rosseti» «O edinoy tekhnicheskoy politike v elektrossetvom komplekse» (novaya redaktsiya) [Regulations of PJSC Rosseti «On a unified technical policy in the electric grid complex» (new edition)] // PAO «Rosseti». *Public Joint Stock Company «Rosseti»*. 2022. URL: [https://rosseti-yug.ru/upload/iblock/04b/Положение%20о%20единой%20технологической%20политике%20ПАО%20Россети%20\(ред.492\).pdf](https://rosseti-yug.ru/upload/iblock/04b/Положение%20о%20единой%20технологической%20политике%20ПАО%20Россети%20(ред.492).pdf) (accessed: 05.11.2023). (In Russ.).

KLETSEL Mark Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Electric Power Engineering Department, Toraihyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan.

SPIN-code: 7986-1196

AuthorID (RSCI): 498610

Correspondence address: mkletsel@mail.ru

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

GIRSHIN Stanislav Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich, Graduate Student of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: krivolapov_vladislav@mail.ru

GORYUNOV Vladimir Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimirkoryunov2016@yandex.ru

TROTSENKO Vladislav Mikhaylovich, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3958-5882

AuthorID (RSCI): 889516

For citations

Kletsel M. Ya., Petrova E. V., Girshin S. S., Krivolapov V. A., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. Increasing the capacity of electric grids based on the integration of meteorological data // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 67–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-67-75.

Received December 21, 2023.

© M. Ya. Kletsel, E. V. Petrova, S. S. Girshin,

V. A. Krivolapov, V. N. Goryunov, V. M. Trotsenko

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе отмечена проблема развития ремонтной инфраструктуры для нового подвижного состава, в том числе с асинхронными тяговыми двигателями. В соответствии с этим в качестве объекта исследований выбран электротехнический комплекс для испытаний асинхронных двигателей. Рассмотрена схема испытаний пары асинхронных машин с применением метода взаимной нагрузки. Для сглаживания бросков тока в переходных режимах в данной схеме применен накопитель электрической энергии. В результате исследований получена математическая модель рассматриваемой схемы испытаний, которая учитывает наличие накопителя энергии, подключенного к звену постоянного тока схемы испытаний. Решение тестовой задачи для проверки работоспособности рассматриваемой схемы показало ее высокую эффективность при сглаживании бросков тока в переходных режимах в схеме взаимной нагрузки.

Ключевые слова: математическая модель, накопитель электрической энергии, электротехнический комплекс, взаимная нагрузка, асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, испытательный стенд, переходный режим.

В связи с необходимостью замены устаревающего парка железнодорожного подвижного состава постоянно внедряются новые типы электровозов и электропоездов (2ЭС10 «Гранит», 2ЭС8/3ЭС8 «Малахит» и ЭС104 «Ласточка») с тяговыми асинхронными двигателями [1]. В наши дни ведется активная разработка нового инновационного магистрального тепловоза 2ТЭ35А с тяговым двигателем А425-430 (ТАД430). Кроме этого, в последние годы происходит общее обновление и развитие промышленного оборудования, в котором также применяются асинхронные двигатели.

Внедрение новых образцов оборудования требует развития существующей инфраструктуры для их обслуживания и ремонта, а также создание новой инфраструктуры [2]. Кроме того, следует проводить работы по мониторингу, анализу, совершенствованию существующих методов и программ испытаний и, при необходимости, разработать новые.

Важность исследований и испытаний асинхронных двигателей зависит от проблем, которые необходимо решать в течение всего жизненного цикла оборудования. Одна из существенных проблем — высокая частота отказов асинхронных двигателей, работающих в сложных системах и в тяжелых условиях эксплуатации. Например, современные асинхронные двигатели, используемые в железнодо-

рожном транспорте, подвергаются самым суровым условиям эксплуатации и поэтому требуют регулярного ремонта и послеремонтных (приемо-сдаточных) испытаний.

Исследования [3–5] показали, что частое использование переходных режимов работы в асинхронных двигателях может привести к локальному перегреву изоляции обмотки статора, что ускоряет старение и приводит к возникновению межвитковых и межфазных замыканий.

Испытания асинхронных двигателей на нагрев [6, 7] (проводятся в течение одного часа при номинальном напряжении, номинальной выходной мощности или номинальном токе) предназначены для установившегося режима работы S1. Этот тип испытаний не дает качественной оценки нагрева асинхронного двигателя в переходных режимах работы. Следовательно, программа испытаний асинхронных двигателей должна быть расширена, чтобы включить переходные режимы работы, соответствующие S2...S3.

Среди методов, применяемых при нагрузочных испытаниях асинхронных двигателей, метод взаимной нагрузки является одним из наиболее энергоэффективных и разрешен к применению в соответствии с действующими инструкциями и ГОСТами. Вышеописанный метод уменьшает потребляемую

электрическую энергию из сети (приблизительно на 60...80 %) за счет того, что одна из машин работает в генераторном режиме и частично компенсирует энергию, потребляемую из сети другой машиной [8, 9, 10]. Метод взаимной нагрузки позволяет проводить испытания асинхронных двигателей большой мощности при более экономичном потреблении электроэнергии из питающей.

В моменте работы асинхронного двигателя в переходных режимах работы в питающей сети может возникать существенный бросок тока и снижение напряжения (наиболее яркий пример — прямой пуск двигателя). Также в ряде случаев возникают проблемы, обусловленные недостатком мощности питающего трансформатора или дефицитом мощности питающей сети. Мероприятия, направленные на решение данных проблем, могут быть связаны со значительными экономическими затратами.

Одним из вариантов решения указанных проблем является компенсация пиковых скачков потребления мощности из питающей сети путем применения накопителя электрической энергии. Данный накопитель может быть подключен в звено постоянного тока соединённых между собой частотных преобразователей, входящих в состав электротехнического комплекса для испытания асинхронных двигателей, как показано на рис. 1 [11].

В наши дни существует множество видов и типов накопителей электрической энергии, из которых выделим несколько основных, которые будут классифицироваться по множеству параметров, из которых отметим в качестве основных: конструктивные и электрические.

К основным конструктивным характеристикам накопителей можно отнести: способ запасаения

энергии: *химический* (аккумуляторные батареи, топливные элементы), *механический* (гидроаккумулирующие электростанции, аккумулированная энергия в виде сжатого воздуха, супермаховики) и *электрический* (конденсаторы, ионисторы и сверхпроводниковый магнитный аккумулятор). Электрические параметры у накопителей электрической энергии схожи с другим электрооборудованием, однако в качестве специфичных выделим: ток разряда и заряда, плотность заряда, внутреннее сопротивление. Также необходимо учитывать массогабаритные параметры накопителей электрической энергии, что в некоторых ситуациях может быть решающим фактором при выборе.

Для электротехнического комплекса, предназначенного для испытаний асинхронных двигателей, ввиду различных конструктивных параметров (требуемый максимальный ток разряда, мощность, энергоемкость, электрическая емкость, номинальное напряжение элемента и др.), целесообразно применить химические или электрические накопители электрической энергии. Ввиду того, что ионисторы (суперконденсаторы), как и обычные конденсаторы, обладают электрической емкостью, применение накопителя электрической энергии на их основе уменьшит пульсации тока и напряжения. К особенностям суперконденсаторов можно отнести низкое напряжение и небольшой разрядный ток единичного элемента. При применении таких элементов в накопителе электрической энергии потребуются соединения необходимого количества элементов в последовательные и параллельные ветви [12].

Ранее был разработан алгоритм расчета структуры электротехнического комплекса для испытаний асинхронных двигателей с короткозамкнутым

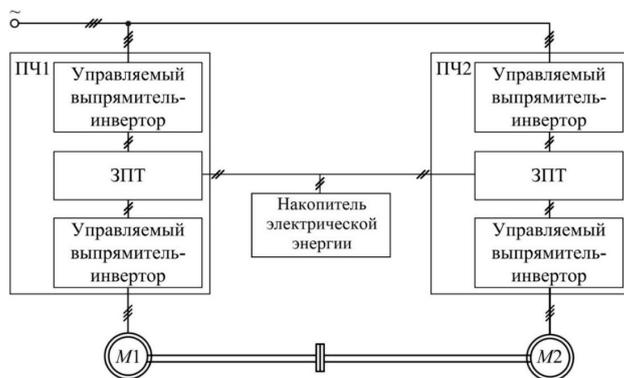


Рис. 1. Схема взаимной нагрузки асинхронных машин с двумя преобразователями частоты и накопителем электрической энергии

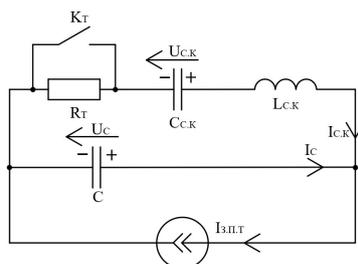


Рис. 2. Принципиальная схема звена постоянного тока электротехнического комплекса с накопителем электрической энергии

ротатором и параметров элементов, входящих в его состав, в том числе накопителя электрической энергии [13].

Для анализа режимов работы электротехнического комплекса предлагается использование математической модели, в состав которой входят два асинхронных двигателя с короткозамкнутыми

ротаторами, которые соединены между собой, и два преобразователя частоты. Данная математическая модель (1) включает в себя систему уравнений для расчета частоты вращения, токов статора и ротора асинхронного двигателя, а также выражения для расчета токов транзисторов и диодов, входящих в состав преобразователей частоты [14, 15].

$$\begin{cases}
 \frac{di1_{1a}}{dt} = \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1a} - i1_{1a}R1_1 + k1_r \left[i'_{2a}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1b} - i1_{1c}) + L1_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di1_{1b}}{dt} = \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1b} - i1_{1b}R1_1 + k1_r \left[i'_{2b}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1c} - i1_{1a}) + L1_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di1_{1c}}{dt} = \frac{1}{L1_1\sigma1} \left[u1_{1c} - i1_{1c}R1_1 + k1_r \left[i'_{2c}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1a} - i1_{1b}) + L1_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
 \frac{di1'_{2a}}{dt} = \frac{-1}{L2_1\sigma1} \left[k1_s(u1_{1a} - i1_{1a}R1_1) + \left[i'_{2a}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1b} - i1_{1c}) + L1_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di1'_{2b}}{dt} = \frac{-1}{L2_1\sigma1} \left[k1_s(u1_{1b} - i1_{1b}R1_1) + \left[i'_{2b}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1c} - i1_{1a}) + L1_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di1'_{2c}}{dt} = \frac{-1}{L2_1\sigma1} \left[k1_s(u1_{1c} - i1_{1c}R1_1) + \left[i'_{2c}R1'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L1_{12}(i1_{1a} - i1_{1b}) + L1_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
 \frac{d\omega}{dt} = \frac{-p}{J\sqrt{3}} \left[L1_{12}[\dot{i}1_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + \dot{i}1_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + \dot{i}1_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] + \dots \right. \\
 \left. \dots + L2_{12}[\dot{i}2_{1a}(i'_{2b} - i'_{2c}) + \dot{i}2_{1b}(i'_{2c} - i'_{2a}) + \dot{i}2_{1c}(i'_{2a} - i'_{2b})] \right] - \frac{M_{\text{пот}}}{J} \text{sign}(\omega); \\
 \frac{di2_{1a}}{dt} = \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1a} - i2_{1a}R2_1 + k2_r \left[i'_{2a}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1b} - i2_{1c}) + L2_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di2_{1b}}{dt} = \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1b} - i2_{1b}R2_1 + k2_r \left[i'_{2b}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1c} - i2_{1a}) + L2_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di2_{1c}}{dt} = \frac{1}{L2_1\sigma2} \left[u2_{1c} - i2_{1c}R2_1 + k2_r \left[i'_{2c}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1a} - i2_{1b}) + L2_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right]; \\
 \frac{di2'_{2a}}{dt} = \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1a} - i2_{1a}R2_1) + \left[i'_{2a}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1b} - i2_{1c}) + L2_2(i'_{2b} - i'_{2c})) \right] \right]; \\
 \frac{di2'_{2b}}{dt} = \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1b} - i2_{1b}R2_1) + \left[i'_{2b}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1c} - i2_{1a}) + L2_2(i'_{2c} - i'_{2a})) \right] \right]; \\
 \frac{di2'_{2c}}{dt} = \frac{-1}{L2_2\sigma2} \left[k2_s(u2_{1c} - i2_{1c}R2_1) + \left[i'_{2c}R2'_2 + \frac{p\omega}{\sqrt{3}}(L2_{12}(i2_{1a} - i2_{1b}) + L2_2(i'_{2a} - i'_{2b})) \right] \right].
 \end{cases} \quad (1)$$

В приведенной системе уравнений использованы следующие обозначения: фазные напряжения, подведенные к обмоткам статора первой и второй машин, — $u1_{1a}$, $u1_{1b}$, $u1_{1c}$, $u2_{1a}$, $u2_{1b}$, $u2_{1c}$, активные сопротивления фазных обмоток статора асинхронных машин $R1_1$ и $R2_1$, приведенные сопротивления фазных обмоток ротора $R1'_1$ и $R2'_2$, количество пар полюсов p , индуктивности фазных обмоток статора и ротора $L1_1$, $L1_2$, $L2_1$, $L2_2$, взаимные индуктивности $L1_{12}$ и $L1_{21}$, коэффициенты магнитной связи ротора и статора $k1_r$, $k1_s$, $k2_r$, $k2_s$, коэффициенты рассеяния $\sigma1$ и $\sigma2$, токи статора первой и второй машины $di1_{1a}$, $di1_{1b}$, $di1_{1c}$, $di2_{1a}$, $di2_{1b}$, $di2_{1c}$, приведенные токи ротора первой и второй машины $di1'_{1a}$, $di1'_{1b}$, $di1'_{1c}$, $di2'_{1a}$, $di2'_{1b}$, $di2'_{1c}$, угловая скорость вращения ротора ω [12]. Такие механические параметры, как суммарный момент инерции вращающейся системы J и суммарный момент потерь $M_{\text{пот}}$ в двух асинхронных машинах, включены в седьмое уравнение.

С целью получения возможности проверки правильности определения параметров рассматриваемого электротехнического комплекса предлагается

дополнить математическую модель уравнениями, описывающими физические процессы, происходящие в звене постоянного тока с учетом подключенного к нему накопителя электрической энергии.

Предложенная схема замещения для звена постоянного тока электротехнического комплекса с подключенным накопителем электрической энергии (рис. 2) включает в себя: резистор R_T , ключ K_T моделирует транзистор, работающий в ключевом режиме, $C_{\text{с.к}}$ — емкость накопителя электрической энергии, $L_{\text{с.к}}$ — индуктивность накопителя электрической энергии, C — емкость конденсатора, подключенного в звено постоянного тока, $I_{\text{з.пт}}$ — ток в звене постоянного тока, $U_{\text{с.к}}$ — напряжение накопителя электрической энергии, U_C — напряжение конденсатора, подключенного в звено постоянного тока, $I_{\text{с.к}}$ — ток накопителя электрической энергии, I_C — ток конденсатора, подключенного в звено постоянного тока.

Математическая модель звена постоянного тока с подключенным накопителем электрической энергии имеет вид:

$$\begin{cases} -L_{C.K} \frac{dI_{C.K}}{dt} = I_{C.K} \cdot R_T - U_{C.K} + U_C; \\ I_{3.П.Т} - I_{C.K} = I_C; \\ I_C = -C \cdot \frac{dU_C}{dt}; \\ I_{C.K} = -C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Для упрощения расчетов выполним следующие преобразования:

$$\begin{cases} -L_{C.K} \cdot C_{C.K} \cdot \frac{d^2 U_{C.K}}{dt^2} = C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt} \cdot R_T - C_{C.K} + C_C; \\ I_{3.П.Т} + C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt} = -C \frac{dy_2}{dt}; \\ I_C = -C \cdot \frac{dU_C}{dt}; \\ I_{C.K} = -C_{C.K} \cdot \frac{dU_{C.K}}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Введем переменные:

$$\begin{cases} y_0 = \frac{-dU_{C.K}}{dt} = \frac{-dy_1}{dt}; \\ y_1 = U_{C.K}; \\ y_2 = U_C. \end{cases} \quad (4)$$

Произведем замену:

$$\begin{cases} -L_{C.K} \cdot C_{C.K} \frac{dy_0}{dt} = C_{C.K} \cdot y_0 \cdot R_T - y_1 + y_2; \\ I_{3.П.Т} - C_{C.K} \cdot y_0 = -C \frac{dy_2}{dt}; \\ \frac{dy_1}{dt} = -y_0. \end{cases} \quad (5)$$

После преобразований итоговая математическая модель будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dy_0}{dt} = -\frac{R_T}{L_{C.K}} \cdot y_0 + \frac{y_1 - y_2}{L_{C.K} \cdot C_{C.K}}; \\ \frac{dy_1}{dt} = -y_0; \\ \frac{dy_2}{dt} = +\frac{I_{3.П.Т}}{C} - \frac{C_{C.K}}{C} \cdot y_0. \end{cases} \quad (6)$$

В качестве тестовой задачи для проверки разработанной математической модели выполнены следующие расчеты в программе Mathcad. Входными данными для расчетов приняты результаты моделирования пуска асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт с применением системы уравнений (1), дополненной выражениями для расчета токов в полупроводниковых элементах преобразователя частоты [14, 15].

На рис. 3 приведена временная диаграмма, отражающая изменение частоты вращения ротора асинхронного двигателя при его пуске в схеме взаимной нагрузки (рис. 2). Полученный при данном расчете ток асинхронного двигателя в звене постоянного тока преобразователей частоты приведен на рис. 4.

Полученные значения тока $I_{3.П.Т}$ использованы в качестве исходных данных для системы уравнений (6).

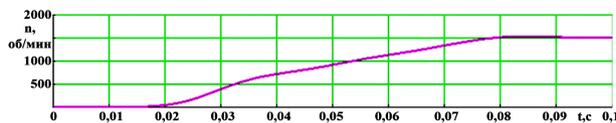


Рис. 3. Частота вращения ротора асинхронного двигателя при пуске

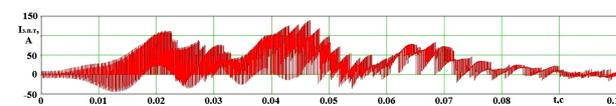


Рис. 4. Сила тока в звене постоянного тока преобразователя частоты $I_{3.П.Т}$ при пуске асинхронного двигателя

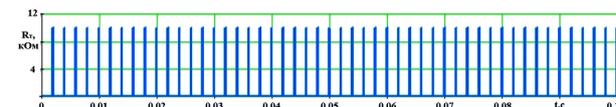


Рис. 5. Сопротивление R_T в ветви накопителя электрической энергии

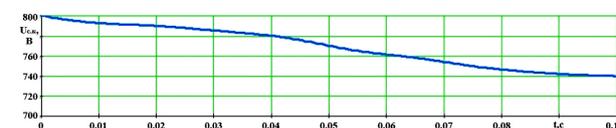


Рис. 6. Временная диаграмма напряжения суперконденсатора

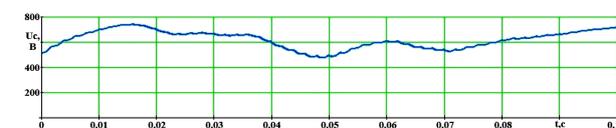


Рис. 7. Временная диаграмма напряжения на штатном конденсаторе звена постоянного тока

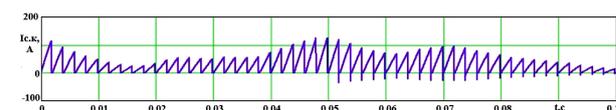


Рис. 8. Временная диаграмма тока разряда суперконденсатора

Для моделирования приняты следующие начальные условия:

$$U_{C.K} = 800 \text{ В}; U_C = 513 \text{ В}.$$

Параметры схемы замещения: $C_{C.K} = 50$ мФ; $C = 2$ мФ; $L_{C.K} = 4$ мГн; $R_T = 10$ кОм.

Резистор R_T имеет частоту подключения $f = 500$ Гц, коэффициент заполнения при работе ключа КТ (отношение длительности) равен 0,1 (рис. 5).

В результате моделирования получены временные диаграммы, приведенные на рис. 6–8.

Временная диаграмма напряжения суперконденсатора приведена на рис. 6.

Временная диаграмма напряжения на штатном конденсаторе преобразователя частоты приведена на рис. 7.

Временная диаграмма тока разряда суперконденсатора приведена на рис. 8.

Анализ временных диаграмм, полученных в результате математического моделирования, показывает, что при разгоне ротора двигателя происходят значительные по величине пульсации тока разряда суперконденсатора, которые существенно снижаются через 0,08 с.

При заданном подключении суперконденсатора в звене постоянного тока с отношением времени работы к периоду включения, равным 0,9, за расчетное время ($t_p = 0,1$ с) происходят значительные колебания напряжения на конденсаторе C_K и заряд накопителя электрической энергии с уменьшением напряжения до 740 В. Колебания напряжений на расчетных диаграммах соответствуют изменениям графиков тока звена постоянного тока и накопителя электрической энергии (рис. 4 и 8): при наибольших токах звена постоянного тока происходит более быстрый заряд накопителя электрической энергии и уменьшение напряжения U_C . Высокие токи суперконденсатора соответствуют не только высоким токам звена постоянного тока, но и перетоку заряда на емкость C , обусловленному значительной разностью напряжений ($U_{CK} - U_C$) в начале переходного процесса.

Полученная система уравнений (5) дополняет известную математическую модель электротехнического комплекса для испытания асинхронного двигателя методом взаимной нагрузки. Данные выражения позволяют рассчитать ток разряда, напряжение накопителя электрической энергии подключенного в звено постоянного тока, в переходных режимах работы электротехнического комплекса. Дополненная новыми выражениями математическая модель позволяет получить данные, необходимые при выборе оборудования в соответствии с разработанной ранее методикой проектирования накопителя электрической энергии [16].

Библиографический список

1. Сайт группы компаний СИНАРА. URL: <https://sinaratm.ru/media/news/> (дата обращения: 26.03.2024).
2. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 26.03.2024).
3. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Худонов А. М., Иванов В. Н. Теоретическое обоснование механизма локального перегрева изоляции в режиме пуска асинхронных вспомогательных машин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2016. Т. 2. С. 378–382. EDN: WHUPDR.
4. Иванов П. Ю., Агафонов В. М., Дульский Е. Ю. Математическое моделирование процесса нагрева изоляции обмотки статора асинхронной вспомогательной машины электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 183–189. EDN: VSYEJN.
5. Иванов П. Ю., Дульский Е. Ю., Худонов А. М. Локальный перегрев изоляции асинхронных вспомогательных машин электровозов в переходных режимах работы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11 (118). С. 194–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200. EDN: XEFJJJ.
6. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Введ. 01–01–1998. Москва: Изд-во стандартов, 2002. 41 с.
7. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. Введ. 01–01–2021. Москва: Стандартинформ, 2011. 42 с.

8. Попов Д. И. Разработка алгоритма выбора схемы испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. С. 458–462. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-458-462. EDN: WDVQVP.

9. Снаров И. М. Повышение энергоэффективности испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки // Энергия-2019: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т. Иваново, 02–04 апреля 2019 г. Иваново: Изд-во ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2019. Т. 4. С. 29. EDN: VURAGY.

10. Казаков Ю. Б., Палилов И. А., Гуляев И. В. Анализ электромеханических процессов в асинхронных машинах при испытаниях методом взаимной нагрузки с рекуперацией энергии в сеть // Электротехника. 2020. № 1. С. 2–8. EDN: KSYGTR.

11. Пат. 217790 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/34. Схема испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки / Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С. № 2023102066; заявл. 30.01.2023; опубл. 18.04.2023. Бюл. № 11.

12. Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Самолинов С. С. Моделирование кратковременных режимов работы тяговых накопителей электроэнергии // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 2 (105). С. 6–17. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-1. EDN: P1DNT.

13. Соколов П. С., Попов Д. И. Разработка методики расчета параметров элементов электротехнического комплекса для испытания асинхронных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 265–271. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-6-265-271. EDN: ERRNWS.

14. Попов Д. И. Разработка научных основ построения электротехнических комплексов для испытания тяговых электротехнических машин методом взаимной нагрузки: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2022. 365 с.

15. Попов Д. И. Математическое моделирование физических процессов в испытательных комплексах электрических машин // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 79–84. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-79-84. EDN: XZBIPZ.

16. Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С. Проектирование накопителя электроэнергии для электротехнических комплексов, предназначенных для испытания асинхронных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 513–521. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-513-514. EDN: STUFBQ.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

ПОПОВ Денис Игоревич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 8506-9250

AuthorID (РИНЦ): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062
AuthorID (SCOPUS): 57200090858
Адрес для переписки: porovomsk@yandex.ru
СОКОЛОВ Павел Сергеевич, аспирант кафедры
«Электрические машины и общая электротехника»
ОмГУПС, г. Омск.
SPIN-код: 9475-2198
AuthorID (РИНЦ): 822996
ORCID: 0000-0001-9945-8836
Адрес для переписки: емое@omgups.ru

Для цитирования

Харламов В. В., Попов Д. И., Соколов П. С. Математическая модель электротехнического комплекса с накопителем электрической энергии для испытания асинхронных двигателей // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 76–82. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-76-82.

Статья поступила в редакцию 04.04.2024 г.
© В. В. Харламов, Д. И. Попов, П. С. Соколов

UDC 621.313.33; 621.314
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-76-82
EDN: MKXFYN

V. V. KHARLAMOV
D. I. POPOV
P. S. SOKOLOV

Omsk State Transport University,
Omsk, Russia

MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTRICAL COMPLEX WITH THE DEVICE OF ELECTRICAL ENERGY STORAGE FOR TESTING INDUCTION MOTORS

The research highlights the problem of developing repair infrastructure for new rolling stock, including those with asynchronous traction motors. Therefore, an electrical engineering complex for testing asynchronous motors was chosen as the object of research. The scheme of testing a pair of asynchronous machines using the method of mutual loading is considered. To smooth out current surges in transient modes, an electric energy storage device is used in this scheme. As a result of the research, a mathematical model of the test circuit in question was obtained, which considered an energy storage device connected to a DC link of the test circuit. The solution of the test problem to verify the operability of the considered circuit showed its high efficiency in smoothing current surges in transient modes in the mutual load circuit.

Keywords: mathematical model, electric energy storage, electrical engineering complex, mutual load, asynchronous motor, short-circuited rotor, test bench, transient mode.

References

1. Sayt gruppy kompaniy SINARA [Website of the SINARA Group of companies]. URL: <https://sinaratm.ru/media/news/> (accessed: 26.03.2024). (In Russ.).
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Rossiyskiye zheleznyye dorogi» do 2025 goda (utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-p [Long-term development program of JSC «Russian Railways» until 2025 (Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-p. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAGA2RXSVoKu.pdf> (accessed: 26.03.2024). (In Russ.).
3. Ivanov P. Yu., Dul'skiy E. Yu., Khudonogov A. M., Ivanov V. N. Teoreticheskoye obosnovaniye mekhanizma lokal'nogo peregreva izolyatsii v rezhime puska asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin [Theoretical substantiation of the mechanism of local overheating of insulation in the start-up mode of asynchronous auxiliary machines] // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. Transport Infrastructure of the Siberian Region*. 2016. Vol. 2. P. 378–382. EDN: WHUPDR. (In Russ.).
4. Ivanov P. Yu., Agafonov V. M., Dul'skiy E. Yu. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa nagreva izolyatsii obmotki statora asinkhronnoy vspomogatel'noy mashiny elektrovoza [Mathematical modeling of the process of heating of stator winding insulation of electric locomotive's asynchronous auxiliary machine] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye. Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016. No. 1 (49). P. 183–189. EDN: VSYEJN. (In Russ.).
5. Ivanov P. Yu., Dul'skiy E. Yu., Khudonogov A. M. Lokal'nyy peregreva izolyatsii asinkhronnykh vspomogatel'nykh mashin elektrovozov v perekhodnykh rezhimakh raboty [Local insulation overheating of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives in transient operating conditions] // *Vestnik*

Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016. Vol. 20, no. 11 (118). P. 194–200. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200. EDN: XEFJJJ. (In Russ.).

6. GOST 7217-87. Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyey. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy [Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods]. Moscow, 2002. 41 p. (In Russ.).

7. GOST R 53472-2009. Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyey. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy [Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods]. Moscow, 2011. 42 p. (In Russ.).

8. Popov D. I. Razrabotka algoritma vybora skhemy ispytaniy asinkhronnykh dvigateley metodom vzaimnoy nagruzki [Development of an algorithm for selecting a test scheme for induction motors by the method of mutual loading] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 2. P. 458–462. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-458-462. EDN: WDQVBP. (In Russ.).

9. Snarov I. M. Povysheniye energoeffektivnosti ispytaniy asinkhronnykh mashin metodom vzaimnoy nagruzki [Improving the energy efficiency of testing asynchronous machines by the method of mutual loading] // *Energia-2019. Energia-2019*. In 6 vols. Ivanovo, 2019. Vol. 4. P. 29. EDN: VURAGY. (In Russ.).

10. Kazakov Yu. B., Palilov I. A., Gulyayev I. V. Analiz elektromekhanicheskikh protsessov v asinkhronnykh mashinakh pri ispytaniyakh metodom vzaimnoy nagruzki s rekuperatsiyey energii v set' [Analysis of electromechanical processes in asynchronous machines during tests by the method of mutual loading with energy recovery into the network] // *Elektrotehnika. Electrical Engineering*. 2020. No. 1. P. 2–8. EDN: KSYGTR. (In Russ.).

11. Patent 217790 U1 Russian Federation, IPC G01 R31/34. Skhema ispytaniya asinkhronnykh mashin metodom vzaimnoy nagruzki [Scheme of testing asynchronous machines by the method of mutual load] / Kharlamov V. V., Popov D. I., Sokolov P. S. No. 2023102066. (In Russ.).

12. Nezevak V. L., Dmitriyev A. D., Samolinov S. S. Modelirovaniye kratkovremennykh rezhimov raboty tyagovykh napoyteley elektroenergii [Simulation of short-term modes of operation of traction power storage devices] // *Mir transporta. World of Transport and Transportation*. 2023. Vol. 21, no. 2 (105). P. 6–17. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-1. EDN: PIIDNT. (In Russ.).

13. Sokolov P. S., Popov D. I. Razrabotka metodiki rascheta parametrov elementov elektrotekhnicheskogo kompleksa dlya ispytaniya asinkhronnykh mashin [Development of a methodology for calculating the parameters of elements of an electrical complex for testing asynchronous machines] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022. No. 6. P. 265–271. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-6-265-271. EDN: ERRNWS. (In Russ.).

14. Popov D. I. Razrabotka nauchnykh osnov postroyeniya elektrotekhnicheskikh kompleksov dlya ispytaniya tyagovykh

elektricheskikh mashin metodom vzaimnoy nagruzki [Development of scientific foundations for the construction of electrotechnical complexes for testing traction electric machines by the method of mutual loading]. Omsk, 2022. 365 p. (In Russ.).

15. Popov D. I. Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov v ispyatel'nykh kompleksakh elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of physical processes in test complexes of electric machines] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 4 (160). P. 79–84. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-79-84. EDN: XZBIPZ. (In Russ.).

16. Kharlamov V. V., Popov D. I., Sokolov P. S. Proyektirovaniye napoytelya elektroenergii dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov, prednaznachennykh dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigateley [Designing an electric power storage device for electrotechnical complexes intended for testing asynchronous motors] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 8. P. 513–521. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-8-513-514. EDN: CTUFBQ. (In Russ.).

KHARLAMOV Viktor Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5093-8463

AuthorID (RSCI): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Correspondence address: emoe@omgups.ru

POPOV Denis Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 8506-9250

AuthorID (RSCI): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062

AuthorID (SCOPUS): 57200090858

Correspondence address: popovomsk@yandex.ru

SOKOLOV Pavel Sergeevich, Graduate Student of Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 9475-2198

AuthorID (RSCI): 822996

ORCID: 0000-0001-9945-8836

Correspondence address: emoe@omgups.ru

For citations

Kharlamov V. V., Popov D. I., Sokolov P. S. Mathematical model of an electrical complex with the device of electrical energy storage for testing induction motors // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 76–82. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-76-82.

Received April 04, 2024.

© V. V. Kharlamov, D. I. Popov, P. S. Sokolov

УТОЧНЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье проанализированы предельные режимы воздушных линий электропередачи по нагреву и по потерям напряжения. Получены уравнения, связывающие между собой температуру провода, потерю напряжения, мощности нагрузки, условия охлаждения и параметры линии. Показано, что в зависимости от длины можно выделить три характерные области, в которых предельные режимы определяются либо только нагревом, либо только потерей напряжения, либо и тем, и другим фактором. Отдельно рассмотрен комбинированный предельный режим, в котором температура провода и потеря напряжения одновременно принимают максимально допустимые значения. Получены новые уточненные критерии оценки допустимости режима линии. В качестве примера рассмотрена линия АС-240 напряжением 220 кВ варьируемой длины, для которой построен ряд зависимостей, характеризующих области существования и условия возникновения предельных режимов.

Ключевые слова: предельные режимы линий, уравнение теплового баланса, воздушные линии электропередачи, температура провода, потери напряжения, допустимый ток.

Введение. При передаче электроэнергии по воздушным линиям температура проводов и уровни напряжения не должны выходить за технически допустимые пределы. На практике получили распространение два способа оценки соответствующих предельных режимов. Первый способ использует упрощенные формулы и применяется при выборе сечений проводов [1–5]. Второй способ основан на точном электрическом расчете установившихся режимов сети и применяется на заключительных стадиях проектирования и при эксплуатации сети [6–10]. Коррекция сечений по данным точных электрических расчетов обычно не производится, а ввод режима в допустимую область осуществляется другими способами.

Использование такого подхода при проектировании сети обеспечивает выполнение технических ограничений, но полученное проектное решение может оказаться неэкономичным. Так, если выбранные по упрощенным формулам сечения окажутся завышенными, то в дальнейшем они уже не будут скорректированы. Точный электрический расчет может указать на необходимость установок дополнительных регулирующих и компенсирующих устройств, применение которых на самом деле

нецелесообразно. Возможен также неправильный выбор количества цепей воздушных линий и даже номинального напряжения.

Применение упрощенных формул при выборе сечений в значительной степени является вынужденным, поскольку параметры сети для точного электрического расчета еще неизвестны. Однако в действительности точный электрический расчет можно выполнить не для всей сети, а только для отдельно взятой линии, используя в качестве исходных данных напряжение в начале линии и мощность нагрузки в конце. Такой подход позволит устранить погрешности упрощенных методов оценки предельных режимов линий уже на начальных этапах проектирования сети. Кроме того, точные электрические расчеты отдельных линий дают возможность установить ряд закономерностей формирования предельных режимов. Такие закономерности могут быть эффективно использованы при решении проектных и эксплуатационных задач даже без проведения точного электрического расчета. Ниже в статье проведен анализ закономерностей и условий возникновения предельно допустимых режимов воздушных линий с неизолированными проводами. Приведенные выкладки справедливы для

напряжений от 35 до 220 кВ. Анализ линий 330 кВ и выше, требующий учета волновых процессов, расщепления фазы и других специфических особенностей, выходит за рамки данной статьи.

Основные расчетные соотношения. Предельные режимы воздушных линий с неизолированными проводами определяются падением напряжения, нагревом проводов, а также устойчивостью режима и погрешностями измерительных трактов. Последние два фактора выходят за рамки данной статьи, поскольку устойчивость определяется не отдельно взятой линией, а всей электрической системой, а погрешности измерительных трактов можно рассматривать как внешнее ограничение, не зависящее от параметров самой линии.

Температура провода определяется уравнением теплового баланса, которое может быть записано в различных формах [11–16]. Используем уравнение, приведенное в [16], которое для неизолированного провода имеет следующий вид:

$$I^2 r_{0,0} (1 + \alpha \Theta) = \pi d_{np} \left[\alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{окр}^4) \right] \quad (1)$$

где $r_{0,0}$ — погонное активное сопротивление при 0 °C; I — ток в проводе; α — температурный коэффициент сопротивления; Θ и $\Theta_{окр}$ — температуры провода и окружающей среды в °C; d_{np} — диаметр провода; $\alpha_{вын}$ — коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией; ε_n — коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная излучения абсолютно черного тела; T и $T_{окр}$ — абсолютные температуры провода и окружающей среды.

На основе уравнения (1) можно получить следующее выражение для предельно допустимой токовой нагрузки:

$$I_{гон} = \sqrt{\frac{\pi d_{np} \left[\alpha_{вын} (\Theta_{гон} - \Theta_{окр}) + \varepsilon_n C_0 (T_{гон}^4 - T_{окр}^4) \right]}{r_{0,0} (1 + \alpha \Theta_{гон})}}, \quad (2)$$

где $\Theta_{гон}$ и $T_{гон}$ — максимально допустимая температура провода соответственно в °C и К.

Хотя допустимые токи проводов приводятся в справочной литературе, этих справочных значений для уточненного анализа недостаточно, так как они не учитывают ряд дополнительных факторов. Одним из таких факторов, например, является зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры окружающей среды [17]:

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_v (v P_{атм})^{0,6}}{(T_{окр} d_{np})^{0,4}}, \quad (3)$$

где k_v — коэффициент угла атаки ветра; v — скорость ветра; $P_{атм}$ — атмосферное давление.

При изменении температуры воздуха от –40 °C до +40 °C коэффициент теплоотдачи изменяется примерно на 12 %.

Для расчета падения напряжения используем П-образную схему замещения линии (рис. 1).

Напряжение в начале и конце линии связаны между собой соотношением:

$$U_1^2 = (U_2 + \Delta U_{np})^2 + \Delta U_{нон}^2. \quad (4)$$

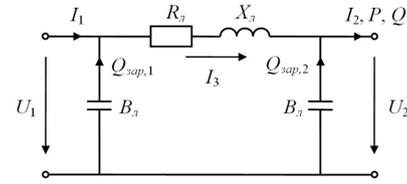


Рис. 1. Схема замещения линии

Здесь ΔU_{np} и $\Delta U_{нон}$ — продольная и поперечная составляющие падения напряжения [18], определяемые через мощности нагрузки P , Q и зарядную мощность в конце линии $Q_{зар,2}$ по формулам:

$$\Delta U_{np} = \frac{PR_{\lambda} + (Q - Q_{зар,2})X_{\lambda}}{U_2},$$

$$\Delta U_{нон} = \frac{PX_{\lambda} - (Q - Q_{зар,2})R_{\lambda}}{U_2}. \quad (5)$$

Предположим, что $\frac{U_1 + U_2}{2} = U_{ном}$ (такой режим

можно назвать *нормированным по номинальному напряжению*) и введем обозначение $\Delta U_{омн}$ — потеря напряжения в линии в относительных единицах (в долях номинального напряжения). Тогда напряжения в начале и конце линии:

$$U_1 = U_{ном} (1 + 0,5 \Delta U_{омн}),$$

$$U_2 = U_{ном} (1 - 0,5 \Delta U_{омн}). \quad (6)$$

Подставим формулы (5) и (6) в (4), разделив правую и левую части на квадрат номинального напряжения. При этом выразим зарядную мощность через емкостную проводимость, а параметры линии — через длину. В результате получим уравнение, связывающее потерю напряжения, мощности нагрузки и длину линии:

$$(1 + 0,5 \Delta U_{омн})^2 = \left[(1 - 0,5 \Delta U_{омн}) \left(1 - \frac{x_0 b_0}{2} l^2 \right) + \frac{Pr_{0,\Theta} + Qx_0}{U_{ном}^2 (1 - 0,5 \Delta U_{омн})} l \right]^2 + \left[\frac{Px_0 - Qr_{0,\Theta}}{U_{ном}^2 (1 - 0,5 \Delta U_{омн})} l + (1 - 0,5 \Delta U_{омн}) \frac{r_{0,\Theta} b_0}{2} l^2 \right]^2. \quad (7)$$

Здесь $r_{0,\Theta}$, x_0 и b_0 — погонные параметры линии (активное сопротивление, индуктивное сопротивление и емкостная проводимость). При этом погонное активное сопротивление вследствие температурной зависимости представляет собой не константу, а переменную:

$$r_{0,\Theta} = r_{0,0} (1 + \alpha \Theta). \quad (8)$$

Температура провода Θ в этой формуле в соответствии с уравнением (1) представляет собой функцию тока, определяющего падение напряжения. В данном случае это будет ток I_3 в продольной ветви схемы замещения (рис. 1), равный:

Исходные данные для расчета комбинированных предельных режимов

Марка провода	АС-240/32
Номинальное напряжение $U_{ном}$	220 кВ
Погонное активное сопротивление при 20 °С $r_{0,20}$	0,1182 Ом/км
Погонное индуктивное сопротивление x_0	0,435 Ом/км
Погонная емкостная проводимость b_0	$2,604 \cdot 10^{-6}$ См/км
Температурный коэффициент сопротивления α	$0,0043 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Диаметр провода $d_{пр}$	0,0216 м
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon_{п}$	0,6
Скорость ветра v	0,6 м/с
Коэффициент угла атаки ветра k_v	0,829087
Атмосферное давление $P_{атм}$	100 кПа
Допустимая температура $\Theta_{доп}$	90 °С

$$I_3 = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{звр,2})^2}}{\sqrt{3}U_2} = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - 0,5b_0IU_2^2)^2}}{\sqrt{3}U_2} \quad (9)$$

Необходимо заметить, что предельный режим по нагреву определяется не током в продольной ветви схемы замещения, а максимальным током в линии. Можно показать, что при достаточно большой мощности и активно-индуктивном характере нагрузки максимальным будет ток в конце линии:

$$I_2 = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_2} \quad (10)$$

Анализ предельных режимов. С теоретической и практической точек зрения особый интерес представляет режим линии, предельный одновременно по нагреву и по падению напряжения. В дальнейшем в статье для этого режима используется название *комбинированный предельный режим*.

Допустимый ток, определяемый по формуле (2), будем рассматривать в уравнениях как константу. Приравняв этот ток к току I_2 , получим уравнение связи активной и реактивной мощности нагрузки для комбинированного предельного режима:

$$P^2 + Q^2 = 3I_{гон}^2 U_2^2 = 3I_{гон}^2 U_{ном}^2 (1 - 0,5\Delta U_{отн})^2 \quad (11)$$

Подставим формулу (9) в уравнение (1) с учетом (6):

$$\frac{P^2 + [Q - 0,5b_0IU_{ном}^2(1 - 0,5\Delta U_{отн})]^2}{3U_{ном}^2(1 - 0,5\Delta U_{отн})^2} r_{0,0}(1 + \alpha\Theta) = \pi d_{пр} [\alpha_{вын}(\Theta - \Theta_{окр}) + \varepsilon_n C_0(T^4 - T_{окр}^4)] \quad (12)$$

Перепишем (7) с учетом (8):

$$(1 + 0,5\Delta U_{отн})^2 = \left[\left(1 - 0,5\Delta U_{отн}\right) \left(1 - \frac{x_0 b_0}{2} I^2\right) + \frac{Pr_{0,0}(1 + \alpha\Theta) + Qx_0 I}{U_{ном}^2(1 - 0,5\Delta U_{отн})} \right]^2 + \left[\frac{Px_0 - Qr_{0,0}(1 + \alpha\Theta)}{U_{ном}^2(1 - 0,5\Delta U_{отн})} I + (1 - 0,5\Delta U_{отн}) \frac{r_{0,0}b_0(1 + \alpha\Theta)}{2} I^2 \right]^2 \quad (13)$$

Совокупность уравнений (11–13) можно рассматривать как систему относительно каких-либо двух параметров линии или нагрузки и температуры Θ . Однако эта температура может изменяться лишь в небольших пределах, поскольку она всегда будет оставаться близкой к допустимой температуре провода по определению комбинированного режима. В результате система (11–13) относительно трех неизвестных (включая Θ) не всегда будет иметь решение. Действительно, комбинированный предельный режим может наблюдаться только при особых условиях.

Чтобы ввести систему (11–13) в область существования решения (т.е. ввести линию в область существования комбинированного предельного режима), следует использовать дополнительную четвертую переменную, которая будет рассматривать-

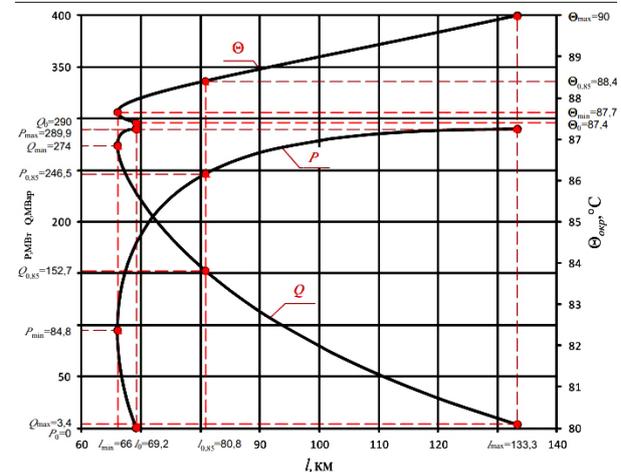


Рис. 2. Зависимости P, Q, Θ от длины линии для провода АС-240/32 в комбинированном предельном режиме

ся как свободно варьируемый параметр. В качестве такого параметра удобно использовать длину линии l .

Ниже приведены результаты решения (11–13) относительно P, Q, Θ при варьировании l для провода АС-240 при различных допустимых потерях напряжения и температурах окружающей среды. Исходные данные представлены в табл. 1.

Скорость ветра 0,6 м/с принята как минимальное значение, при котором определяются справочные допустимые токи. Коэффициент угла атаки ветра подобран так, чтобы при принятой формуле для коэффициента теплоотдачи и при нормированных условиях охлаждения допустимый ток провода, определяемый по формуле (2), был в точности равен справочному значению 610 А. Допустимая температура провода принята равной 90 °С для послеаварийных режимов согласно [19], поскольку именно такие режимы являются определяющими по пропускной способности.

На рис. 2 показаны зависимости P, Q, Θ от длины линии при температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ и потере напряжения $\Delta U_{отн} = 0,2$.

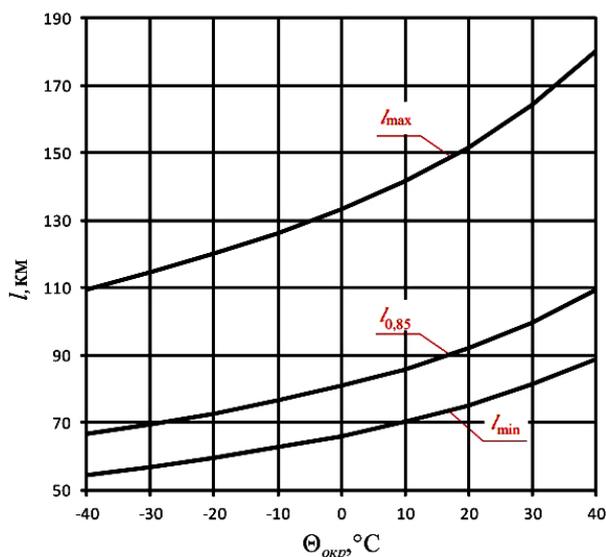


Рис. 3. Зависимости l_{\min} , l_{\max} , $l_{0,85}$ для провода АС-240/32 от температуры окружающей среды при потере напряжения $\Delta U_{\text{отн}} = 0,2$

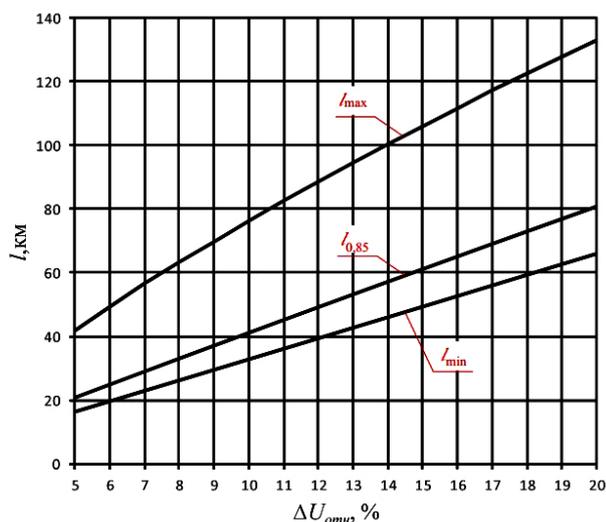


Рис. 4. Зависимости l_{\min} , l_{\max} , $l_{0,85}$ для провода АС-240/32 от потери напряжения при температуре окружающей среды $\theta_{\text{окр}} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Из рис. 2 видно, что длина разделяет режимы линий на три характерных области. Первая область — длина линии $l < l_{\min}$. В этой области комбинированного предельного режима не существует, а существует только предельный режим, определяемый нагревом проводов. Во второй области $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$ существуют все виды рассматриваемых предельных режимов. В третьей области $l > l_{\max}$ комбинированного предельного режима снова не существует, а существует только предельный режим, определяемый потерей напряжения.

Использование значений l_{\min} и l_{\max} позволит одновременно упростить и уточнить инженерные расчеты при проектировании и эксплуатации линий электропередачи. Так, при $l < l_{\min}$ линию достаточно проверить только по нагреву, а условие проверки по потере напряжения при этом выполнится автоматически, причем с гарантированной точностью. При $l > l_{\max}$, наоборот, достаточно проверить линию только по потерям напряжения, а условие проверки по нагреву выполнится автоматически.

Значения l_{\min} и l_{\max} зависят от марки провода, номинального напряжения, температуры окружающей среды и от допустимой потери напряжения. На рис. 3, 4 показаны зависимости этих длин от температуры окружающей среды и допустимой потери напряжения для провода АС-240/32 напряжением 220 кВ. На этих же рисунках показана также длина линии $l_{0,85}$, соответствующая комбинированному предельному режиму при типовом коэффициенте мощности обобщенной нагрузки $\cos\varphi = 0,85$. Эти зависимости могут быть легко параметризованы для каждого провода. Из рис. 4 видно, что зависимости длин l_{\min} и $l_{0,85}$ от потери напряжения практически линейны, что дополнительно упрощает аппроксимацию.

Основная часть области существования комбинированного предельного режима характеризуется ростом предельной активной мощности и снижением предельной реактивной мощности с увеличением длины. Эти закономерности объясняются тем, что реактивная мощность влияет на потери напряжения гораздо сильнее, чем активная, а полная мощность от длины не зависит. Однако рост активной мощности с увеличением длины не следует понимать как повышение пропускной способности линии — это не более чем результат снижения реактивной мощности при условии постоянства полной мощности.

Одновременно с ростом активной мощности незначительно возрастает и температура провода θ . Эта не максимальная температура провода, а температура, приблизительно осредненная по длине. Ее отличие от максимальной температуры провода обусловлено влиянием емкости линии на реактивный ток в продольной ветви схемы замещения. Рост активной мощности приводит к снижению доли реактивного тока в общем токе нагрузки. В результате влияние емкости на общий ток нагрузки становится слабее, что и приводит к сближению осредненной и максимальной температуры.

В области комбинированного предельного режима существует небольшой участок длин $l_{\min} < l \leq l_0$, на котором система (11–13) имеет не одно, а два решения, то есть при одной и той же длине существует два предельных режима. Первый из этих режимов характеризуется большей активной и меньшей реактивной мощностью по сравнению со вторым режимом. Различие активных мощностей больше, чем реактивных. Этим компенсируется более сильное влияние реактивной мощности на потери напряжения по сравнению с активной мощностью. Участок $l_{\min} < l \leq l_0$ можно назвать областью неоднозначности предельных режимов. Его наличие приводит к тому, что рост активной мощности комбинированного предельного режима с увеличением длины начинается не от нуля, а сразу от некоторого начального положительного значения P_{\min} .

Следует также заметить, что верхняя граница области существования комбинированного предельного режима l_{\max} несколько условна. Это связано с тем, что при очень малых реактивных нагрузках ток I_3 в продольной ветви схемы замещения становится больше тока I_2 в конце линии за счет емкостного тока (зарядной мощности). Формально это приводит к увеличению температуры θ . Однако в действительности зарядная мощность поглощается потерями реактивной мощности в продольной ветви схемы замещения линии и не приводит к физическому увеличению тока. На принятой схеме замещения этот процесс проявляется только в начале линии. Но в действительности он проис-

ходит по всей длине. Поэтому ток I_3 перестает определять средний нагрев провода (хотя и продолжает определять потерю напряжения).

В данной статье длина l_{\max} определена при условии $I_3 = I_2$. Более точное определение этой длины требует учета распределенности параметров линии и выходит за рамки данной статьи. Однако из рис. 2 видно, что погрешность расчета этой длины не может быть значительной.

Обозначим мощности комбинированного предельного режима как P_{np} , Q_{np} . Тогда режим линии будет гарантированно допустимым при выполнении условий:

$$P \leq P_{np}, \quad Q \leq Q_{np}. \quad (14)$$

Эти условия можно рассматривать как *достаточные условия допустимости режима линии*. Если одно из условий (14) выполнилось, а другое не выполнилось, то режим может быть как допустимым, так и недопустимым. Наконец, если оба условия (14) не выполнились, то режим является недопустимым.

Мощности P_{np} , Q_{np} могут быть аппроксимированы как функции длины, потери напряжения и температуры окружающей среды, что позволит использовать их при практических расчетах.

В области неоднозначности условия (14) в принципе можно было бы проверять для обоих предельных режимов. Однако режим с меньшей активной мощностью крайне маловероятен, поскольку реактивная мощность в этом режиме как минимум в несколько раз больше активной. Таким образом, в области неоднозначности целесообразно рассматривать только предельный режим с большей активной и меньшей реактивной мощностью.

Выводы. В результате проведенных исследований получены новые критерии, которые могут быть использованы при выборе сечений и анализе пропускной способности линий электропередачи. К этим критериям относятся длины l_{\min} , l_{\max} , а также мощности P_{np} , Q_{np} . Длины представляют собой вспомогательные критерии, которые указывают на необходимость проведения тех или иных расчетов, а мощности определяют достаточное условие допустимости режима в диапазоне длин от l_{\min} до l_{\max} .

Если длина линии не превышает значение l_{\max} , а оба условия (14) одновременно выполняются либо одновременно не выполняются (при длине больше l_{\min}), то указанные критерии позволяют обходиться без электрического расчета всей сети, не теряя при этом в точности. Более того, электрический расчет сети может ограничить пропускную способность линии по устойчивости. Однако такое ограничение справедливо лишь при определенном соотношении между нагрузками потребителей, которое на практике может оказаться другим, в результате чего оценка пропускной способности линий на основе данных расчета всей сети окажется неверной (точнее, заниженной).

Предлагаемый в статье подход лишен этого недостатка. Его использование будет способствовать повышению обоснованности проектных решений, а также более полному использованию пропускной способности линий в условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Веников В. А., Глазунов А. А., Жуков Л. А. [и др.]. Электрические системы. Электрические сети / под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. Москва: Высш. шк, 1998. 511 с.

2. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии. Москва: КНОРУС, 2012. 648 с.

3. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. Москва: НЦ ЭНАС, 2012. 376 с.

4. Христофоров Д. А., Хужина З. Б., Варганова А. В., Дубина И. А. Методика выбора оптимальных сечений проводников электрических сетей 35–220 кВ // Энергетические и электротехнические системы. 2015. Вып 2. С. 124–129. EDN: VJYGMR.

5. Кабышев А. В., Обухов С. Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения: справочные материалы по электрооборудованию. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 168 с.

6. Данилов М. И., Романенко И. Г. Определение потоков мощности и температуры проводов электрической сети установившегося состояния энергосистемы // Электрические станции. 2022. № 7. С. 25–37. DOI: 10.34831/EP.2022.1092.7.005. EDN: TDESGC.

7. Колосок И. Н., Аксаева Е. С., Глазунова А. М. Расчет максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях на основе методов оценивания состояния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 3. С. 145–153. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-145-153. EDN: YUUBFS.

8. Хомутов С. О., Поляков И. А., Чугунов Г. А., Капустин С. Д. Программа расчета области допустимых режимов работы в контролируемых сечениях энергосистемы // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. 2015. С. 175–181. EDN: VJZTPZ.

9. Васильковская А. В., Шепелев А. О., Шепелева Е. Ю. Определение максимально допустимого перетока активной мощности в сечении с учетом тепловых режимов линий электропередачи // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). С. 131–138. DOI: 10.18822/byusu202301131-138. EDN: DUROBX.

10. Капустин С. Д., Поляков И. А. Определение допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем // Интеллектуальная энергетика: сб. науч. ст. 2021. С. 257–261.

11. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П. [и др.]. Определение предельных токовых нагрузок воздушных линий электропередачи с учетом сохранения их габарита // Хэйлунцзян-Приамурье: III Междунар. научно-образовательный форум: сб. материалов Междунар. науч. конф. 2019. С. 663–672. EDN: GQZHRU.

12. Фигурнов Е. П., Жарков Ю. И., Харчевников В. И. Уточненная методика вычисления длительно допустимых токов неизолированных проводов воздушных линий электропередачи и контактных сетей // Электричество. 2021. № 2. С. 36–43. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-2-36-43. EDN: VZLLQQ.

13. Hu X., Cotton I. Impact of climate change on static ratings of overhead line in Edinburgh // 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC). 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714985.

14. Dong X., Wang C., Liang J. [et al.]. Calculation of power transfer limit considering electro-thermal coupling of overhead transmission line // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29, no. 4. P. 1503–1511. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2296553.

15. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И. [и др.]. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях // Энергия единой сети. 2021. № 3 (58). С. 44–53. EDN: OTRUNZ.

16. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Ляшков А. А., Бигун А. Я. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 218. EDN: VIDWFF.

17. Петрова Е. В., Бигун А. Я., Птицына Е. В., Янишевская А. Г. Совершенствование расчетов потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем по результатам численного моделирования в условиях вариации нагрузки //

Омский научный вестник. 2012. № 1(107). С. 242–247. EDN: QVVFBF.

18. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 592 с. ISBN 5-283-01012-0.

19. ГОСТ 839–2019. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Введ. 01–05–2020. Москва: Стандартинформ, 2019. 40 с.

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

ДЕЕВ Владислав Александрович, магистрант гр. ЭЭм-231 кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: vlad_deev@inbox.ru

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

КРОПОТИН Олег Витальевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4218-4900

AuthorID (РИНЦ): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

ResearcherID: H-4616-2013

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapovvladislav1998@gmail.com

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

Для цитирования

Гиршин С. С., Деев В. А., Петрова Е. В., Кропотин О. В., Криволапов В. А., Горюнов В. Н. Уточненный анализ предельных режимов воздушных линий электропередачи // Омский научный вестник. № 4 (192). С. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-83-90.

Статья поступила в редакцию 29.03.2024 г.

© С. С. Гиршин, В. А. Деев, Е. В. Петрова,

О. В. Кропотин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов

REFINED ANALYSIS OF THE LIMIT MODES OF OVERHEAD POWER LINES

The article analyzes the limiting modes of overhead power transmission lines in terms of heating and voltage losses. The equations linking the wire temperature, voltage loss, load power, cooling conditions and line parameters are obtained. Depending on the length, three characteristic regions can be distinguished in which the limiting modes are determined either only by heating, or only by voltage loss, or both. A combined limit mode is considered separately, in which the wire temperature and voltage loss simultaneously assume the maximum permissible values. New refined criteria for assessing the admissibility of the line mode have been obtained. As an example, the AC-240 line with a 220 kV voltage of varying length is considered, for which a number of dependencies characterizing the areas of existence and conditions for the occurrence of limit modes are constructed.

Keywords: limit modes of lines, heat balance equation, overhead power lines, wire temperature, voltage losses, permissible current.

References

1. Venikov V. A., Glazunov A. A., Zhukov L. A. [et al.]. Elektricheskiye sistemy. Elektricheskiye seti [Electrical systems. Electric networks] // Ed. by V. A. Venikova, V. A. Stroyeva. Moscow, 1998. 511 p. (In Russ.).
2. Gerasimenko A. A., Fedin. V. T. Peredacha i raspredeleniye elektricheskoy energii [Transmission and distribution of electric energy]. Moscow, 2012. 648 p. (In Russ.).
3. Karapetyan I. G., Faybisovich D. L., Shapiro I. M. Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey [Handbook for the design of power networks] / Ed by D. L. Faybisovicha. Moscow, 2012. 376 p. (In Russ.).
4. Khristoforov D. A., Khuzhina Z. B., Varganova A. V., Dubina I. A. Metodika vybora optimal'nykh secheniy provodnikov elektricheskikh setey 35-220 kV [Effective line conductor cross-section procedure under the conditions electric networks 35–220 kV] // Energeticheskiye i elektrotekhnicheskiye sistemy. *Energy and Electrical Engineering Systems*. 2015. Issue 2. P. 124–129. EDN: VJYGMR. (In Russ.).
5. Kabyshev A. V., Obukhov S. G. Raschet i proyektirovaniye sistem elektrosnabzheniya: Spravochnyye materialy po elektrooborudovaniyu [Calculation and design of power supply systems: Reference materials on electrical equipment]. Tomsk, 2005. 168 p. (In Russ.).
6. Danilov M. I., Romanenko I. G. Opredeleniye potokov moshchnosti i temperatury provodov elektricheskoy seti ustanovivshegosya sostoyaniya energosistemy [Determination of Power Flows and Temperature of Electric Network Wires of the Power System Steady State] // Elektricheskiye stantsii. *Electrical Stations*. 2022. No. 7. P. 25–37. DOI: 10.34831/EP.2022.1092.7.005. EDN: TDESCG. (In Russ.).
7. Kolosok I. N., Aksayeva E. S., Glazunova A. M. Raschet maksimal'no dopustimyykh peretokov v kontroliruyemykh secheniyakh na osnove metodov otsenivaniya sostoyaniya [State estimation method-based calculation of maximum permissible flows in monitored sections] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. No. 3. P. 145–153. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-145-153. EDN: YUUBFS. (In Russ.).
8. Khomutov S. O., Polyakov I. A., Chugunov G. A., Kapustin S. D. Programma rascheta oblasti dopustimyykh rezhimov raboty v kontroliruyemykh secheniyakh energosistemy [Program for calculating admissible operation modes in controlled power system sections] // Elektroenergetika glazami molodezhi: tr. VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. *Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference «Electric Power Industry through the Eyes of the Youth»*. 2015. P. 175–181. EDN: VJZTPZ. (In Russ.).
9. Vaskovskaya A. V., Shepelev A. O., Shepeleva E. Yu. Opredeleniye maksimal'no dopustimogo peretoka aktivnoy moshchnosti v sechenii s uchetom teplovykh rezhimov liniy elektroperedachi [Determination of the maximum allowable active power flow in the section taking into account the thermal conditions of power transmission lines] // Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. *Yugra State University Bulletin*. 2023. No. 1 (68). P. 131–138. DOI: 10.18822/byusu202301131-138. EDN: DUROBX. (In Russ.).
10. Kapustin S. D., Polyakov I. A. Opredeleniye dopustimyykh peretokov aktivnoy moshchnosti v kontroliruyemykh secheniyakh energosistem [Determination of permissible overflows of active power in controlled sections of power systems] // Intellektual'naya energetika. *Smart Energy*. 2021. P. 257–261. (In Russ.).

11. Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Pazenko N. P. [et al.]. Opredeleniye predel'nykh tokovykh nagruzok vozduzhnykh liniy elektroperedachi s uchetom sokhraneniya ikh gabarita [Determination of current limit loads of overhead power lines, taking into account the preservation of their size] // Kheyluntsyan-Priamur'ye: III Mezhdunar. nauchno-obrazovatel'nyy forum: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. *Proceedings of the III International Scientific and Educational Forum «Heilongjiang-Amur Region»*. 2019. P. 663–672. EDN: GQZHRU. (In Russ.).

12. Figurnov E. P., Zharkov Yu. I., Kharchevnikov V. I. Utochnennaya metodika vychisleniya dlitel'no dopustimyykh tokov neizolirovannykh provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi i kontaknykh setey [Modified methodology of computation of admissible continuous currents of plain conductors of overhead transmission lines and catenaries] // *Elektrichestvo. Elektrichestvo*. 2021. No. 2. P. 36–43. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-2-36-43. EDN: VZLLQQ. (In Russ.).

13. Hu X., Cotton I. Impact of climate change on static ratings of overhead line in Edinburgh // 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC). 2013. P. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714985. (In Engl.).

14. Dong X., Wang C., Liang J. [et al.]. Calculation of power transfer limit considering electro-thermal coupling of overhead transmission line // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29, no. 4. P. 1503–1511. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2296553. (In Engl.).

15. Ignatenko I. V., Vlasenko S. A., Pukhova A. I. [et al.]. Algoritm kontrolya tokov v LEP v zadannykh ekspluatatsionnykh usloviyakh [Algorithm current control in the power line in the specified operational conditions] // *Energiya edinoy seti. Energy of Unified Grid*. 2021. No. 3 (58). P. 44–53. EDN: OPUHZ. (In Russ.).

16. Petrova E. V., Girshin S. S., Lyashkov A. A., Bigun A. Ya. Analiticheskoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provoda vozduzhnoy linii v usloviyakh vyzhdennoy konveksii [The analytical decision of the equation of thermal balance of the wire of the air-line in the conditions of compelled convection] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Modern Problems of Science and Education*. 2015. No. 1. P. 218. EDN: VIDWFF. (In Russ.).

17. Petrova E. V., Bigun A. Ya., Ptitsyna E. V., Yanishevskaya A. G. Sovershenstvovaniye raschetov poter' v vozduzhnykh liniyakh elektroenergeticheskikh sistem po rezul'tatam chislennogo modelirovaniya v usloviyakh variatsii nagruzki [Calculation of losses in air lines of electrical power systems based on the results of numerical modeling under variation of load] // *Omskiy Nauchny Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2012. No. 1 (107). P. 242–247. EDN: QBVFBF. (In Russ.).

18. Idel'chik V. I. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow, 1989. 592 p. ISBN 5-283-01012-0. (In Russ.).

19. GOST 839–2019. *Provoda neizolirovannyye dlya vozduzhnykh liniy elektroperedachi. Tekhnicheskiye usloviya*

[Non-insulated conductors for overhead power lines. Specifications]. Moscow, 2019. 40 p. (In Russ.).

GIRSHIN Stanislav Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

DEEV Vladislav Aleksandrovich, Undergraduate, gr. ЭЭМ-231 of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: vlad_deev@inbox.ru

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

KROPOTIN Oleg Vital'yevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4218-4900

AuthorID (RSCI): 118225

ORCID: 0000-0002-6620-9945

ResearcherID: H-4616-2013

AuthorID (SCOPUS): 6505835545

KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich, Graduate Student of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: krivolapovvladislav1998@gmail.com

GORYUNOV Vladimir Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimircoryunov2016@yandex.ru

For citations

Girshin S. S., Deev V. A., Petrova E. V., Kropotin O. V., Krivolapov V. A., Goryunov V. N. Refined analysis of the limit modes of overhead power lines // *Omsk Scientific Bulletin*. No. 4 (192). C. 83–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-83-90.

Received March 29, 2024.

© S. S. Girshin, V. A. Deev, E. V. Petrova,

O. V. Kropotin, V. A. Krivolapov, V. N. Goryunov

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ PVSYSYSTEM

Солнечная фотоэлектрическая энергия является одним из наиболее существующих и быстро растущих возобновляемых источников энергии, который имеет практическое применение в нескольких областях благодаря своей высокой доступности, огромному потенциалу и экологической совместимости. По сравнению с другими источниками энергии наблюдается значительный рост использования фотоэлектрической энергии в мире. Такое массовое использование фотоэлектрической энергии обусловлено простотой процесса преобразования, поскольку солнечное излучение напрямую преобразуется в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических элементов. Кроме того, фотоэлектрические системы производят чистую энергию и не загрязняют окружающую среду, тем самым способствуя борьбе с глобальным потеплением. Фотоэлектрическая энергия требует меньше обслуживания, поскольку из-за отсутствия механических компонентов ее можно легко интегрировать в электрическую сеть. Фотоэлектрические модули предназначены для выработки максимальной мощности при воздействии солнечного излучения. Но на их производительность влияют многие параметры, такие как температура и солнечное излучение. На производительность фотоэлектрических систем также влияют внешние факторы окружающей среды, такие как загрязнение. Для оптимизации производства энергии используются солнечные трекеры MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Целью данного исследования является предложение эффективного метода проектирования и моделирования фотоэлектрической электростанции мощностью 11 МВт, подключенной к национальной сети Нигера, с использованием программного обеспечения PVsyst. *Метод:* выбор типа системы (системы, подключенной к сети), географического расположения места установки с использованием базы данных программного обеспечения. Затем следует ориентация фотоэлектрической системы, выбор технологии фотоэлектрической системы (фотоэлектрические панели, инверторы, трансформаторы и т. д.) и их калибровка, изучение детальных потерь (потери системы, потери в проводах и потери массива) и выполнение команды для моделирования системы. *Результаты:* разработана проектно-имитационная модель фотоэлектрической электростанции мощностью 11 МВт, состоящая из 29120 фотоэлектрических панелей мощностью 385 Вт каждая, 133 трекера MPPT и инвертора мощностью 66 кВт переменного тока каждый и трансформатора среднего напряжения мощностью 11 МВт. Проект был смоделирован, и полученные результаты проанализированы. *Практическая значимость исследования* заключается в том, что полученные результаты уже отправлены в кабинет президента Нигера (департамент энергетики) для проверки и практического внедрения. Проектирование и моделирование фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst позволяет инженерам, ученым и исследователям приобрести навыки проектирования и моделирования фотоэлектрических систем.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, инвертор, фотоэлектрическая система, солнечная электростанция, солнечные трекеры MPPT, моделирование PVSystem.

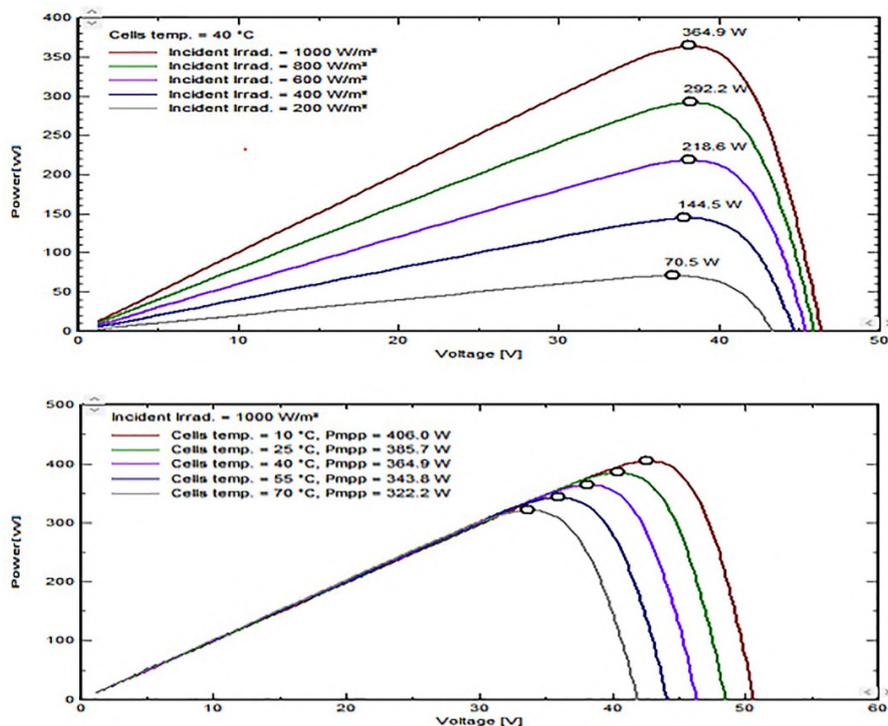


Рис. 1. Характеристики силы–напряжения модуля PV (Photovoltaic) для различных условий солнечного излучения и температуры

Введение. В настоящее время солнечная энергия привлекла внимание всего мира, играет жизненно важную роль и доказала, что является чистой и устойчивой энергией [1–3]. Солнечная энергия в виде солнечного излучения может быть напрямую преобразована в электричество с использованием технологии фотоэлектрических панелей [4–7]. Фотоэлектрические панели состоят из солнечных элементов, изготовленных из полупроводников, которые поглощают солнечное излучение и преобразуют его непосредственно в электричество. Однако исследования показали, что солнечные элементы на основе полупроводников, используемые при производстве фотоэлектрических панелей, имеют эффективность от 15 до 20 % [7, 8]. Для повышения эффективности системы используются такие приложения, как солнечный трекер и контроллер МРРТ (Maximum Power Point Tracking). Солнечные панели при установке обеспечивают максимальную выходную мощность, но существуют факторы, влияющие на снижение этой мощности [9, 10]. Фотоэлектрический элемент характеризуется кривыми мощность–напряжение и напряжение–ток. Для различных значений солнечной радиации и температуры эти характеристики показаны на рис. 1.

На рис. 1 показана зависимость мощности от солнечного излучения и температуры. Эти два параметра — температура и солнечное излучение — влияют на производительность фотоэлектрического модуля. Помимо этих двух параметров, качество солнечной энергии, вырабатываемой фотоэлектрическими устройствами, зависит от гибкости других компонентов глобальной системы и условий окружающей среды [11, 12]. Установка фотоэлектрической системы вызывает различные факторы, которые влекут за собой потери энергии и влияют на конечную передачу. В этой работе факторы классифицируются как потери в массиве (Array losses), потери в проводах (wiring losses) и потери в системе (system losses) [13–16].

Потери в массиве (Array losses). Потери в массиве — это потери, которые влияют на доступную выходную энергию фотоэлектрического генератора относительно номинальной мощности модуля, указанной производителем для стандартных условий. К этим потерям относятся:

Загрязнение (Soiling Losses) — процесс, при котором пыль, грязь и/или органические отходы оседают на поверхности фотоэлектрического генератора. Это оказывает существенное влияние на производство энергии. Одним из наиболее часто используемых измерений для количественной оценки качества грязи, осаждающейся на фотоэлектрическом модуле, является скорость загрязнения (rs). Последняя версия стандарта IEC 61724-1 определяет rs как соотношение между фактической и номинальной электрической мощностью. Коэффициент загрязнения определяется соотношением, как показано в формуле (1) [17]:

$$rs = \frac{Z_{soil}}{Z_{clean}}, \quad (1)$$

где Z_{soil} представляет электрическую мощность в реальных условиях загрязнения; Z_{clean} представляет электрическую мощность в реальных чистых условиях.

Коэффициент тепловых потерь (The thermal loss factor) — относится к потере производительности модуля из-за изменения теплового поля. Коэффициент тепловых потерь используется для определения потерь энергии, которые могут возникнуть из-за разницы температур между номинальной температурой элементов, при которой указана мощность (25 °C) и фактической температурой окружающей среды фотоэлектрических модулей и элементов, которые нагреваются под воздействием падающего солнечного света.

Световая дегерация LID (Ligth — Induced Degradation) — потеря производительности фото-

электрических модулей, которая происходит в самые первые дни воздействия солнца. Зависит от технологии и предоставляется производителем.

Потеря качества модуля (Module quality Loss) — относится к отклонению средней эффективности модуля от производственных условий.

Потери из-за несоответствия (Mismatch loss) — потери, вызванные небольшими различиями в электрических характеристиках установленных модулей.

Потери из-за несоответствия параметров элементов в цепи (String mismatch loss) — относятся к разнице электрических параметров отдельных элементов на уровне цепи. В этом случае несоответствие напряжений электрических сборок имеет важное значение, поскольку они расположены параллельно.

Коэффициент потерь наклона или эффект падения, называемый IAM (Incidence Angle Modifier), — соответствует уменьшению облучения, достигающего поверхности фотоэлектрической ячейки, по сравнению с облучением при нормальном падении.

Потери в проводах (wiring losses). Потери в проводке постоянного тока (DC wiring loss) вызываются сопротивлением, связанным с кабелями и соединениями приборов и фотоэлектрических цепей.

Потери в проводке переменного тока (AC wiring loss) возникают из-за импеданса между проводами и точками подачи, например, между нагрузкой и трансформатором напряжения.

Системные потери (system losses). Недоступность системы (Unavailability of the system).

Недоступность системы можно определить как долю времени, в течение которого система неактивна, то есть не производит энергию из-за технического обслуживания или незапланированных отключений. Это может занять часы и даже дни.

Вспомогательные потери (auxiliary losses). Эти потери представлены вспомогательными устройствами, используемыми для управления системой. Это могут быть вентиляторы, кондиционеры, компьютеры или любое другое потребление энергии, которое необходимо вычест из энергии, производимой фотоэлектрической системой, для подачи в сеть.

Целью этой статьи является предложение использовать программное обеспечение PVsystem для разработки методологии расчета солнечной электростанции мощностью 11 МВт, подключенной к сети. Для более удобного понимания работы данного приложения была взята энергетическая сеть Республики Нигер. Страна Сахеля, Нигер площадью 1 267 000 км² является континентальной страной в самом сердце Западной Африки. Ее территория богата огромными природными ресурсами (уголь, нефть, золото, уран и т. д.), но их добыча слишком мала. В условиях энергетического перехода производство энергии в основном осуществляется на ископаемом топливе, которое выделяет огромное количество парниковых газов. Что касается солнечного потенциала Нигера, то в стране преимущественно солнечно (около 300 дней в году). Солнечная радиация варьируется от 5 до 7 кВтч/м²/день и хорошо распределена по территории страны, с высоким уровнем прямой радиации (более 65 % от общего количества солнечного света). По данным Нигерийской электроэнергетической компании (Nigelec) и Министерства энергетики, конечное потребление электроэнергии в 2020 году составило 1350 ГВтч [18].

В этом потреблении преобладает сектор домашних хозяйств (53,8 %), за ним следуют сектор услуг (26,5 %), промышленный сектор (19,1 %) и гидроэнергетика (0,6 %). После событий 26 июля 2023 года, ознаменовавших приход к власти военных, Нигер подвергся тяжелым экономическим, политическим и энергетическим санкциям, например, прекращению поставок электроэнергии Нигерией. В этой ситуации новые власти решили диверсифицировать производство энергии, отдавая предпочтение возобновляемым источникам энергии, особенно солнечной и гидроэлектроэнергии. В связи с этим главный вопрос, который можно задать, заключается в следующем: будет ли производство солнечной энергии эффективным для поддержки национальной электросети, что и попытались выяснить при помощи программного обеспечения PVsystem.

Критерии выбора региона Ниамей для установки фотоэлектрической электростанции мощностью 11 МВт. Выбор этой мощности обусловлен тем, что выбранный район потребляет больше энергии и имеет самый низкий уровень электрификации, чем другие регионы. Еще одна причина, по данным Министерства энергетики, в 2021 году общая установленная мощность, которая должна потребляться различными производственными единицами в этом районе, составила 147,83 МВт, а располагаемая вырабатываемая мощность — 105,85 МВт, что составляет разницу в 41,98 МВт между располагаемой и установленной мощностью [18]. Затем в июле 2023 года состоится открытие фотоэлектрической электростанции в Гору Банда мощностью 30 МВт. Для восполнения дефицита предусмотрена установка солнечной электростанции мощностью 11 МВт.

Географические координаты региона Ниамей. Ниамей расположен в юго-западной части Нигера между 13°15' и 13°24' южной широты и 2°15' восточной долготы. Перепад высот составляет от 160 до 250 м, а административные границы простираются на 552,27 км², включая примерно 297,46 км² урбанизированной территории. Приблизительная численность населения составляет 1 026 848 жителей в 2012 году и 1 164 680 человек, а плотность составляет 4 564,4 человека на км².

Используется программное обеспечение с базой данных в реальном времени, также известны климатические данные места установки. Данные представлены в табл. 1.

Анализ климатических данных, полученных с помощью программы, показывает, что программа PVsyst дает достаточную информацию о солнечной установке.

Материалы и методы. В данной статье основное внимание уделяется моделированию фотоэлектрической электростанции мощностью 11 МВт, подключенной к сети. Для этой работы используется пробная версия 7.4.5 программного обеспечения PVsystem. Выбор программного обеспечения основан на его производительности и эффективности моделирования фотоэлектрических установок. Согласно различным исследованиям, оценивающим точность моделирования программного обеспечения PVsyst, было выявлено, что это программное обеспечение дает ошибку в результатах примерно 3,37 % [19-22]. Структура программного обеспечения PVsyst показана на рис. 2.

Входные данные (Input data). Географические параметры сайта (программа использует базу данных Métronorme (Meteonorm, Online), содержащую

Климатические данные, полученные с помощью программного обеспечения PVsyst

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
Janvier	150.9	72.46	24.47	170.8	151.0	1355092	1319587	0.689
Février	153.2	80.31	28.01	165.8	146.7	1284619	1250476	0.673
Mars	185.9	97.85	32.25	192.1	169.9	1456881	1418943	0.659
Avril	195.2	95.71	34.72	192.5	170.0	1449541	1412841	0.655
Mai	198.0	97.01	35.05	187.0	164.5	1419905	1384340	0.660
Juin	191.3	91.48	31.90	177.2	155.8	1372816	1338692	0.674
Juillet	200.0	89.59	29.77	186.3	163.6	1456860	1420617	0.680
Août	183.2	90.19	28.19	177.2	155.8	1396937	1132402	0.570
Septembre	182.1	83.77	29.29	185.3	163.5	1450080	1412910	0.680
Octobre	178.4	83.06	31.70	191.1	168.9	1477239	1302148	0.608
Novembre	159.5	65.02	29.00	181.2	160.1	1408515	1373102	0.676
Décembre	147.7	66.46	25.49	170.2	150.5	1346787	1312056	0.688
Année	2125.6	1012.91	29.99	2176.7	1920.4	16875271	16078115	0.659

Légendes

GlobHor Irradiation globale horizontale

DiffHor Irradiation diffuse horizontale

T_Amb Température ambiante

GlobInc Global incident plan capteurs

GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages

EArray Energie effective sortie champ

E_Grid Energie injectée dans le réseau

PR Indice de performance

Легенды (Legends):

GlobHor: Горизонтальная глобальная иррадиация

DiffHor: Диффузная горизонтальная иррадиация

T_Amb: Температура окружающей среды

GlobInc: Глобальный план датчиков инцидентов

GlobEff: Глобальная эффективная корректировка для IAM и затенения (Effective Global Corrected for IAM and shadings)

EArray: Эффективная энергия на выходе поля

E_Grid: Энергия, поступающая в сеть (Energy injected into the network)

PR: Коэффициент производительности (Performance Ratio)



Рис. 2. Структура PVsyst [19]

метеорологические данные практически из каждой точки планеты. Моделирование, выполняемое PVsyst, осуществляется ежечасно, а данные, предоставляемые Meteonorm, — ежемесячно[23].

Ориентация: в этой части указывается угол наклона и азимут согласно географическому положению участка. Также существует возможность установки солнечного трекера с одной или двумя осями в зависимости от необходимости.

Система: эта часть PVsyst позволяет настраивать и создавать компоненты базы данных. Здесь расположены, например, фотоэлектрические панели и инверторы. Подробные потери; к этим потерям относятся, тепловые потери, потери, зависящие от качества модуля; потери от засорения и др. Система использует набор предопределенных значений для этих потерь и может быть изменена.

Таблица 2

Параметры модуля и инвертора

Photovoltaic Panel		Inverter Specifications	
Panel model	TSM-385 DE15H(II)	Inverter model	Solar Inverter M80H (400VAC)
Panel power	385 Wp	Unite power	66 KWac
Imp	9,610 A	Operating voltage	200 – 800 V
Vmpp	40,10 V	Maximum AC Power	66 Kva
Voc	48,50 V	Main voltage	400 V
Isc	10,03 A	Absolute Maximum PV voltage	1000 V

Таблица 3

Параметры подсистемы

Количество панелей последовательно	16
Количество панелей параллельно	130
Количество фотоэлектрических модулей	2080
Общее количество инверторов	19
Общая номинальная мощность	4227 М ²

Таблица 4

Общие настройки системы

Информация о системе, подключенной к электрической сети	
Ориентация фотоэлектрического поля	Фиксированная плоскость
Наклон/Азимут (Tilt/Azimuth)	15/0°
Количество фотоэлектрических модулей	29120
Общая номинальная мощность модулей	11,21 МВтп
Общее количество инверторов	133
Общая номинальная мощность инверторов	8778 КВа _с
Предел мощности сети (Grid power limit)	11 МВтп
Общая площадь	59175 м ²
Внешний трансформатор среднего напряжения	11,04 МВт

Пиковая мощность Втп (W_p) — мощность, вырабатываемая фотоэлектрической панелью при стандартных условиях: T = 25 °C, I_r = 1000 Вт/м².

Таблица 5

Основные результаты

Производство информационных систем	
Системное производство (System production)	16096 МВтч/год
Конкретное производство (specific production)	1436 кВтч/кВтп/год
Нормализованное производство (normalized production)	3,93 кВтч/кВтп/день
Потери массива (Array losses)	1,84 кВтч/кВтп/день
Системные потери (System losses)	0,19 кВтч/кВтп/день
Коэффициент производительности (Performance Ratio)	0,66
Экономическая оценка	
Общая стоимость установки (Total installation cost)	5 744 430 Евро
Сокращение выбросов CO ₂ (Saved CO ₂ emissions)	3800,220 тонн CO ₂

Экономическая оценка: эта часть включает все финансовые параметры проекта, а именно инвестиции, цену на электроэнергию, углеродный баланс и др [24].

Моделирование PVsyst (PVsyst run simulation).

После правильного ввода всех необходимых данных запускается моделирование, а полученные результаты отображаются и даже экспортируются.

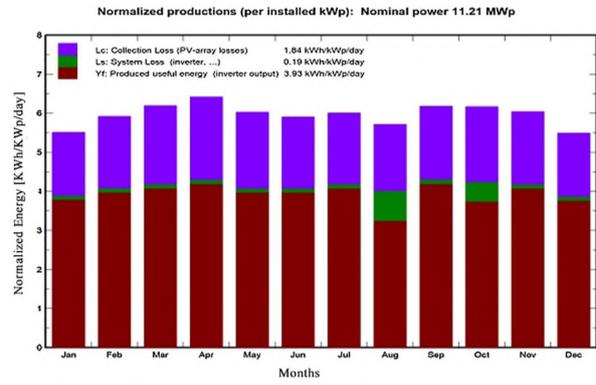


Рис. 3. Стандартизированное производство

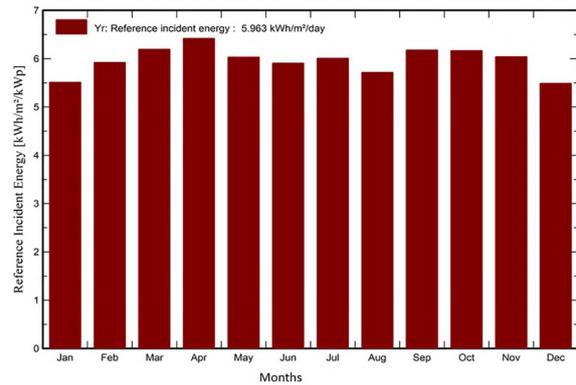


Рис. 4. Энергия падения

Выходные данные (Output data). На выходе получается много информации о системе и вырабатываемой энергии. Такие результаты, как параметры моделирования, производство энергии, соотношение удельной производительности и производительности, специальные графики производительности моделирования.

Программное обеспечение широко используется в частном секторе и в академических кругах.

При моделировании были использованы следующие ограничения: не определена 3D сцена, свободный горизонт, затенения (shading) и собственное потребление (self-consumption), все вышеперечисленное не учитывалось.

Для реализации проекта создается подсистема мощностью 800 кВт одной сборки. Эта подсистема, занимающая площадь 4223 м², состоит из фотоэлектрических модулей марки Trina Solar мощностью 385 Вт и инверторов марки Delta Energy мощностью 66 кВт. Чтобы получить мощность 11 МВт с учетом различных потерь, подсистему умножают на 14. Параметры модуля и инвертора приведены в табл. 2, параметры подсистемы — в табл. 3 и общие данные системы представлены в табл. 4.

Результаты и обсуждение. После моделирования основные результаты системы группируются в таблицу, как показано в табл. 5, а остальные результаты — в виде графиков.

В табл. 5 суммирован баланс производства энергии системой, различные потери при производстве энергии системой, общая стоимость установки системы и количество предотвращенных выбросов парниковых газов CO₂.

Анализ рис. 3 показывает следующие результаты:

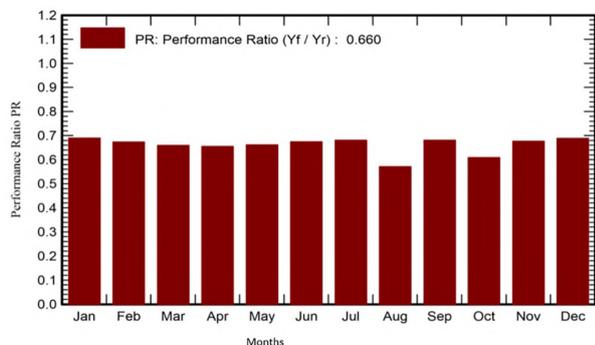


Рис. 5. Коэффициент производительности

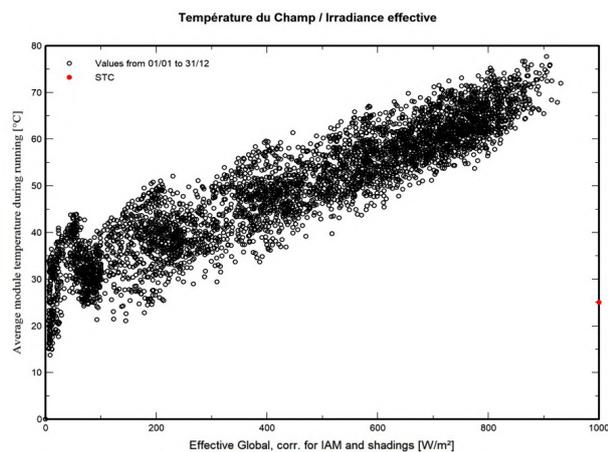


Рис. 6. Температура фотоэлектрического поля

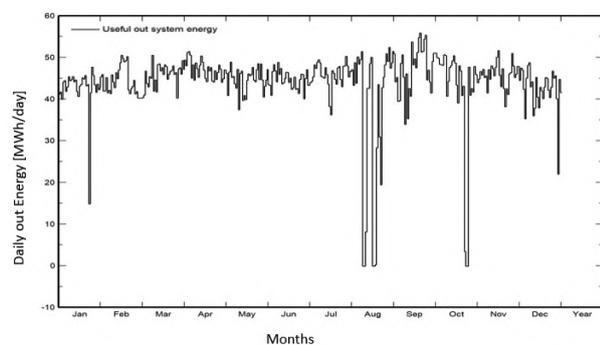


Рис. 7. Ежедневное количество энергии на выходе системы

— производство полезной энергии на выходе инвертора составляет 3,93 кВтч/кВтп/день;

— потери инверторной системы составляют порядка 0,19 кВтч/кВтп/день;

— потери от фотоэлектрических панелей составляют порядка 1,84 кВтч/кВтп/день.

Все эти потери могут быть связаны либо с неблагоприятным солнечным светом, который не позволяет фотоэлектрическим панелям улавливать максимальное солнечное излучение, либо с плохим подключением инверторов, либо с какими-либо другими потерями.

Анализ рис. 4 показывает, что падение энергии очень значительно в апреле, достигая 6,5 кВтч/м²/день, тогда как в январе и декабре падение энергии составляет 5,5 кВтч/м²/день. Это объясняется тем, что в Нигере в декабре и январе начинаются холо-

да, появляется облачность, поэтому солнечный свет не очень эффективен.

Анализ рис. 5 показывает, что коэффициент производительности практически постоянен в течение года, за исключением августа. Это объясняется тем, что в августе небо полностью покрыто облаками, поэтому солнечной радиации недостаточно.

Анализ рис. 6 показывает, что средняя температура модуля является функцией глобального эффективного излучения на поверхности Земли.

Анализ рис. 7 показывает ежедневное производство энергии в течение года. Наблюдается низкое энерговыделение в январе и декабре, что связано с рассеянием прямой солнечной радиации пылевой дымкой.

Что касается очень низкого производства энергии, то он наблюдается в период с июля по август, сентябрь и октябрь, это связано с сезоном дождей, в результате чего небо полностью закрывается облаками.

Заключение. В этой статье описывается проектирование и моделирование фотоэлектрической установки мощностью 11 МВт, подключенной к национальной сети, выполненное с использованием программного обеспечения PVsyst, с учетом факторов, влияющих на эффективность производства этой фотоэлектрической системы. В последние годы были проведены многочисленные исследования этих факторов, и результаты показали, как эти факторы напрямую влияют на производительность фотоэлектрических систем. Этот проект направлен на удовлетворение растущего спроса населения на электроэнергию. Реализация этого проекта увеличит национальное производство, снизит себестоимость производства энергии, будет способствовать социально-экономическому развитию региона, а также будет способствовать снижению выбросов CO₂. Использование программного обеспечения для проектирования и моделирования PVsystem позволяет оптимизировать производство фотоэлектрической солнечной энергии.

Библиографические список

- Обухов С. Г., Плотников И. А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 38–51. EDN: ZCIDNX.
- Atelier d'échange sur les meilleurs pratiques en exploitation et maintenances des centrales Photovoltaïque en Tunisie. 25 février 2020. URL: [https://energypedia.info/wiki/Atelier_d'exchange_sur_les_meilleures_pratiques_en_exploitation_et_maintenance_\(O%26M\)_pour_les_centrales_PV_en_Tunisie](https://energypedia.info/wiki/Atelier_d'exchange_sur_les_meilleures_pratiques_en_exploitation_et_maintenance_(O%26M)_pour_les_centrales_PV_en_Tunisie) (дата обращения: 12.03.2024).
- Bessa J. G., Micheli L., Almonacid F., Fernandez E. F. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies // iScience. 2021. Vol. 24 (3). 102165. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102165.
- Longares J. M., Jimenez A. G., Polanco N. G. Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparaison // Solar Energy. 2023. Vol. 257. P. 155–163. DOI: 10.1016/j.solener.2023.04.005.
- Subhi A. Al., Mossad M. I., Farrag T. A. PV parameters estimation using optimized deep neural networks // Sustainable computing: Informatics and System. 2024. Vol. 41. P. 100960. DOI: 10.1016/j.suscom.2024.100960.
- Alsumiri M., Khashab H isham El. Solar Energy Technology choice Development // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 64 (6). 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/20186402003.

7. Ministère du Pétrole, de l'Energie et des Energies Renouvelables. Système d'Information Energétique du Niger Rapport 2021.
8. Mendalek N., Haddad K. Al. Photovoltaic System Modeling and Simulation // 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2017. P. 1522–1527. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7915592.
9. Dehghanzadeh A., Farahani G., Vahedi H., Haddad K. Al. Explicit double-exponential modeling methods for photovoltaic cells // 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2017. P. 423–428. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7913268.
10. Muhtar A., Mustika I. W., Suharyanto. Comparison of ANN-BP and ANN-PSO as Learning Algorithm to track MPP in PV System // 2017 7th International Annual Engineering Seminar (InAES). 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/INAES.2017.8068573.
11. Slouma S., Mustapha S. S., Slama-Belkhdja I., Machmoum M. Frequency Separation Control of Energy Management System for building // 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/irec.2016.7478868.
12. Kessaissi F. Z., Zegaoui A., Hadji A. A. [et al.]. Comparison of two PV modules Technologie Using Analytical and Experimental Methods // Energy Procedia. Vol. 74. P. 389–397. DOI:10.1016/j.egypro.2015.07.635.
13. Salame Ch., Aillerie M., Papageorgas P. The international Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability // Energy Procedia. 2014. Vol. 50. P. 1–2. DOI: 10.1016/S1876-6102(14)01202-8.
14. Sehirli E. Comparison of the input filter effect to PV panel by SEPIC MPPT Converter // Energy Report. 2023. Vol. 9. P. 34–50. DOI: 10.1016/j.egypr.2023.05.238.
15. Lu D., Zhou T., Fakham H., Frabcois B. Disign of a power management system for an active PV station including various storage technologies // 2008 IEEE 23th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2008. P. 1–8. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635583.
16. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Haider A. [et al.]. Economic Feasibility Study of a Hybrid Power Station Between Solar Panels and Wind Turbine with The National Grid in Al-Hayy City in the Central of Iraq // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1184. DOI: 10.1088/1757-899X/1184/1/012001.
17. Azeez R. A., Abdul-Hussein M. K., Mahdi M. S., AlRikabi H. T. S. Design a system for an approved video copyright over cloud based on biometric iris and random walk generator using watermark technique // Periodicals of Engineering Natural Sciences. 2021. Vol. 10, № 1. P. 178–187. DOI: 10.13140/RG.2.2.12100.50566.
18. Majhool M. H., Rikabi H., Mansour R. Enhancing the Efficiency of Solar Cell Based on the Internet of Things Applications // Wasit Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 10, № 1. DOI: 10.31185/ejuow.Vol10.Iss1.229.
19. Salim H. T., Jasim N. A. Design and Implementation of Smart City Applications Based on the Internet of Things // International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM). 2021. Vol. 15, № 13. P. 4–15. DOI: 10.3991/ijim.v15i13.22331.
20. Majhool M. H., Alrikabi H. T. S., Farhan M. S. Using Internet of Things application for Monitoring Photo-Voltaic Panel Based on Ask Sensors Cloud // Design Engineering. 2021. Vol. 10, № 1. P. 3884–3896. DOI: 10.17762/de.vi.5340.
21. Al-Rikabi H. An assessment of electricity sector reforms in Iraq // Al-Bayan Center for Planning Studies. 2017. URL: <https://www.bayancenter.org/en/2017/09/1264/#> (дата обращения: 03.04.2024).
22. Brinckerhoff P. Iraq Electricity Master Plan: 2010 to 2030. Final Report. Baghdad: Parsons Brinckerhoff, 2010.
23. 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.
24. B. Co. INES – Integrated National Energy Strategy. 2012.

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

Финансирование: Исследования не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в отношении данной статьи.

Вклад автора: Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Для цитирования

Косарева-Володько О. В., Алилу Сани Маман Кабиру. 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.

Статья поступила в редакцию 08.05.2024 г.

© О. В. Косарева-Володько, Алилу Сани Маман Кабиру

DESIGN AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING PVSYSYSTEM SOFTWARE

Photovoltaic energy system is one of the most popular and quickly expanding renewable energy sources because of its great availability, enormous potential, and environmental sustainability. In addition, photovoltaic systems produce clean energy and not pollutant thus contributing to the fight against global warming. Photovoltaic system requires less maintenance given the absence of mechanical components, and it can be also integrated to the electrical grid.

The objective of this research is proposed an effective method for designing and Modeling of an 11 MWp photovoltaic plant capacity connected to the national grid of Niger by using software PVsyst.

Method: choice of the type of system (system connected to the network), the geographic location of the installation site using the software database. Then comes the orientation of the photovoltaic system, the choice of the technology of the photovoltaic system (photovoltaic panels, inverters, transformers... etc) and their calibrations, Study of detailed losses (system losses, wiring losses and array losses) and execution of the command to simulate the system.

Results: design and simulation model of an 11MWp photovoltaic power plant was developed composed of 29120 photovoltaic panels with a power of 385 Wp each, 133 MPPT inverters with a power of 66 KWac each and a Medium Voltage transformer with a capacity of 11 MW. The project has been simulated and results obtained has been analyzed.

Practical significance of the research: Design and Simulation of photovoltaic system using the software allows the engineers, academics and researchers to acquire skills in the design and simulation of photovoltaic systems.

Keywords: photovoltaic module, inverter, photovoltaic system, solar power plant, MPPT solar trackers, PVsystem modeling.

References

1. Obukhov S. G., Plotnikov I. A. Imitatsionnaya model' rezhimov raboty avtonomnoy fotoelektricheskoy stantsii s uchetom real'nykh usloviy ekspluatatsii [Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions] // Izvestiya Tomskogo Politekhnikeskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineerin.* 2017. Vol. 328, no. 6. P. 38–51. EDN: ZCIDNX. (In Russ).

2. Atelier d'échange sur les meilleures pratiques en exploitation et maintenances des centrales Photovoltaïque en Tunisie. 25 février 2020 [Workshop on best practice in the operation and maintenance of photovoltaic power plants in Tunisia. 25 February 2020]. URL: [https://energypedia.info/wiki/Atelier_d'échange_sur_les_meilleures_pratiques_en_exploitation_et_maintenance_\(O%26M\)_pour_les_centrales_PV_en_Tunisie](https://energypedia.info/wiki/Atelier_d'échange_sur_les_meilleures_pratiques_en_exploitation_et_maintenance_(O%26M)_pour_les_centrales_PV_en_Tunisie) (accessed: 12.03.2024). (In Fr.).

3. Bessa J. G., Micheli L., Almonacid F., Fernandez E. F. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies // *iScience.* 2021. Vol. 24 (3). 102165. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102165. (In Engl.).

4. Longares J. M., Jimenew A. G., Polanco N. G. Multiphysics simulation of bifacial photovoltaic modules and software comparaiso // *Solar Energy.* 2023. Vol. 257. P. 155–163. DOI: 10.1016/j.solener.2023.04.005. (In Engl.).

5. Subhi A. Al., Mossad M. I., Farrag T. A. PV parameters estimation using optimized deep neural networks // *Sustainable computing: Informatics and System.* 2024. Vol. 41. P. 100960. DOI: 10.1016/j.suscom.2024.100960. (In Engl.).

6. Alsumiri M., Khashab H isham El. Solar Energy Technology choice Development // *E3S Web of Conferences.* 2018. Vol. 64 (6). 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/20186402003. (In Engl.).

7. Ministère du Pétrole, de l'Energie et des Energies Renouvelables. Système d'Information Energétique du Niger Rapport 2021 [Ministry of Petroleum, Energy and Renewable Energies. Niger Energy Information System Report 2021]. (In Fr.).

8. Mendalek N., Haddad K. Al. Photovoltaic System Modeling and Simulation // 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2017. P. 1522–1527. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7915592. (In Engl.).

9. Dehghanzadeh A., Farahani G., Vahedi H., Haddad K. Al. Explicit double-exponential modeling methods for photovoltaic cells // 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2017. P. 423–428. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7913268. (In Engl.).

10. Muhtar A., Mustika I. W., Suharyanto. Comparison of ANN-BP and ANN-PSO as Learning Algorithm to track MPP in PV System // 2017 7th International Annual Engineering Seminar (InAES). 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/INAES.2017.8068573. (In Engl.).

11. Slouma S., Mustapha S. S., Slama-Belkhdja I., Machmoum M. Frequency Separation Control of Energy Management System for building // 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/irec.2016.7478868. (In Engl.).
12. Kessaissi F. Z., Zegaoui A., Hadji A. A. [et al.]. Comparaison of two PV modules Technologie Using Analytical and Experimental Methods // Energy Procedia. Vol. 74. P. 389–397. DOI:10.1016/j.egypro.2015.07.635. (In Engl.).
13. Salame Ch., Aillerie M., Papageorgas P. The international Conference on Technology and Materiels for Renewable Energy, Environement and Sustainability // Energy Procedia. 2014. Vol. 50. P. 1–2. DOI: 10.1016/S1876-6102(14)01202-8. (In Engl.).
14. Sehirli E. Comparison of the input filter effect to PV panel by SEPIC MPPT Converter // Energy Repport. 2023. Vol. 9. P. 34–50. DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.238. (In Engl.).
15. Lu D., Zhou T., Fakham H., Frabcois B. Disign of a power management system for an active PV station including various storage technologies // 2008 IEEE 23th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2008. P. 1–8. DOI: 10.1109/EPEPMC.2008.4635583. (In Engl.).
16. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Haider A. [et al.]. Economic Feasibility Study of a Hybrid Power Station Between Solar Panels and Wind Turbine with The National Grid in Al- Hayy City in the Central of Iraq // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1184. DOI: 10.1088/1757-899X/1184/1/012001. (In Engl.).
17. Azeez R. A., Abdul-Hussein M. K., Mahdi M. S., ALRikabi H. T. S. Design a system for an approved video copyright over cloud based on biometric iris and random walk generator using watermark technique // Periodicals of Engineering Natural Sciences. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 178–187. DOI: 10.13140/RG.2.2.12100.50566. (In Engl.).
18. Majhool M. H., Rikabi H., Mansour R. Enhancing the Efficiency of Solar Cell Based on the Internet of Things Applications // Wasit Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 10, no. 1. DOI: 10.31185/ejuow.Vol10.Iss1.229. (In Engl.).
19. Salim H. T., Jasim N. A. Design and Implementation of Smart City Applications Based on the Internet of Things // International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM). 2021. Vol. 15, no. 13. P. 4–15. DOI: 10.3991/ijim.v15i13.22331. (In Engl.).
20. Majhool M. H., Alrikabi H. T. S., Farhan M. S. Using Internet of Things application for Monitoring Photo-Voltaic Panel Based on Ask Sensors Cloud // Design Engineering. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 3884–3896. DOI: 10.17762/de.vi.5340. (In Engl.).
21. Al-Rikabi H. An assessment of electricity sector reforms in Iraq // Al-Bayan Center for Planning Studies. 2017. URL: <https://www.bayancenter.org/en/2017/09/1264/#> (accessed: 03.04.2024). (In Engl.).
22. Brinckerhoff P. Iraq Electricity Master Plan: 2010 to 2030. Final Report. Baghdad: Parsons Brinckerhoff, 2010. (In Engl.).
23. 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. (In Engl.).
24. B. Co. INES – Integrated National Energy Strategy. 2012. (In Engl.).

KOSAREVA-VOLODKO Olga Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of 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, Graduate Student of 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

For citations

Kosareva-Volodko O. V., Alilu Sani Maman Kabiru. Design and simulation of photovoltaic systems using PVsystem software // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 91–99. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-91-99.

Received May 08, 2024.

© O. V. Kosareva-Volodko, Alilu Sani Maman Kabiru

НАБЛЮДАТЕЛЬ РАСХОДА ЖИДКОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Статья посвящена разработке системы идентификации объемной подачи жидкости в насосных установках. Актуальность работы обусловлена растущими требованиями к автоматизации управления насосными системами. Ключевым элементом системы является наблюдатель, который позволяет оценивать основные параметры работы установки, такие как скорость вращения насоса и момент сопротивления. Для электропривода насоса используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, частота вращения которого регулируется. Давление в нагнетательном трубопроводе создается центробежным насосом. В основе наблюдателя лежит модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат, а для оценки скорости вращения и момента сопротивления насоса применяется наблюдатель Люенбергера. Для идентификации объемного расхода используется модель центробежного насоса, параметризованная полиномом второй степени. Авторы приводят результаты моделирования, показывающие высокую точность работы разработанного наблюдателя, с погрешностью не более 3 % в установившемся режиме. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода к построению системы мониторинга насосных установок.

Ключевые слова: идентификатор расхода, асинхронный электропривод, наблюдатель Люенбергера, центробежный насос, двойная беличья клетка ротора, насосная установка.

Введение. Регулируемый электропривод центробежных насосных установок имеет широкое применение в промышленности, добыче, транспорте жидкостей [1–4]. Увеличение степени автоматизации процессов перекачки жидкости требует измерения и определения большого числа параметров насосных установок [5]. Одним из таких важных параметров является мгновенный объемный расход или подача перекачиваемой жидкости. При этом прямое измерение расхода не всегда возможно по техноэкономическим и конструктивным решениям.

Прямое измерение объемного расхода насосной установки предполагает использование следующих основных способов [6]:

- ультразвуковой способ;
- электромагнитный способ;
- вихревой способ;
- массовый способ.

Ультразвуковой метод основан на использовании ультразвуковых волн для определения скорости потока жидкости в трубопроводе. В этом случае применяются ультразвуковые датчики, установленные на внешней стороне трубы, которые излучают и принимают ультразвуковые сигналы, распространяющиеся под углом к направлению потока. Измеряя разницу во времени прохождения сигнала по направлению и против направления потока, можно вычислить среднюю скорость потока, а затем, зная площадь поперечного сечения трубы,

определить объемный расход. Ультразвуковые расходомеры отличаются высокой точностью, широким диапазоном измерений и возможностью работы с различными типами жидкостей, включая коррозионно-активные и загрязненные. Они также не создают гидравлического сопротивления в трубопроводе и могут устанавливаться непосредственно на действующих трубопроводах.

Электромагнитный метод основан на использовании явления электромагнитной индукции. Принцип действия электромагнитного расходомера заключается в том, что при прохождении жидкости, являющейся электропроводящей средой, через магнитное поле, создаваемое электромагнитами, в жидкости возникает электрический ток, пропорциональный скорости потока. Измеряя разность потенциалов, возникающую между электродами, расположенными перпендикулярно направлению магнитного поля, можно определить объемный расход жидкости. Электромагнитные расходомеры отличаются высокой точностью, широким диапазоном измерений, не создают сопротивления потоку, а также могут работать с электропроводящими жидкостями, включая слабоминерализованные и загрязненные.

Вихревой метод основан на измерении частоты колебаний вихрей, возникающих за телом обтекания (например, за кольцевой перегородкой) при движении жидкости через трубопровод. Частота колебаний вихрей пропорциональна скорости по-

тока, а измеряя поперечное сечение трубопровода, можно рассчитать объемный расход. Вихревые расходомеры отличаются простотой конструкции, надежностью и устойчивостью к внешним воздействиям, а также возможностью работы с широким спектром жидкостей, включая пульпы, суспензии и жидкости с механическими примесями.

Массовый метод измерения расхода основан на прямом определении массы жидкости, протекающей через трубопровод за единицу времени. Это достигается с помощью массовых расходомеров, использующих принцип инерции движущейся жидкости или эффект Кориолиса. Массовые расходомеры отличаются высокой точностью, не зависят от физических свойств жидкости (плотность, вязкость) и позволяют определять не только объемный, но и массовый расход. Однако они, как правило, более дорогостоящие и сложные в конструкции по сравнению с другими типами расходомеров.

Помимо прямых методов измерения объемного расхода, таких как ультразвуковой, электромагнитный, вихревой и массовый, существуют и косвенные способы определения расхода жидкости. Эти методы основаны на измерении других параметров, связанных с расходом, и последующем пересчете объемного расхода. Один из косвенных способов — это измерение перепада давления на сужающем устройстве, установленном в трубопроводе. Принцип действия основан на законе Бернулли — при сужении потока скорость жидкости увеличивается, а давление уменьшается. Измерив перепад давления до и после сужающего устройства (например, диафрагмы или трубы Вентури), можно рассчитать объемный расход по калибровочной характеристике сужающего элемента. Данный метод прост, надежен и не требует специальных датчиков расхода, однако имеет ограниченный диапазон измерений и чувствителен к изменению свойств жидкости. Еще один косвенный способ — это измерение скорости потока с помощью трубки Пито. Данное устройство представляет собой L -образную трубку, один конец которой направлен навстречу потоку, а второй — параллельно ему. Разность давлений между этими концами пропорциональна квадрату скорости потока, что позволяет рассчитать объемный расход при известной площади поперечного сечения трубопровода. Трубки Пито отличаются простотой конструкции, низкой стоимостью и устойчивостью к загрязнениям, однако имеют ограниченный диапазон измерений и требуют тщательной установки. Также косвенное определение расхода возможно на основе измерения времени прохождения жидкости между двумя точками трубопровода. Для этого используются, например, времяпролетные расходомеры, в которых измеряется время распространения ультразвукового или электромагнитного сигнала между двумя датчиками, установленными на определенном расстоянии друг от друга. Зная это время и расстояние, можно вычислить среднюю скорость потока, а затем — объемный расход. Данный метод отличается высокой точностью, но требует более сложной аппаратуры и настройки.

Эффективное управление электроприводом часто предполагает необходимость получения информации о его механических координатах, таких как скорость вращения, угловое положение ротора, момент нагрузки и другие. Прямое измерение этих параметров с помощью датчиков связано с дополнительными затратами, усложнением конструкции и снижением надежности системы.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов оценки (наблюдения) механических координат электропривода на основе измерения электрических величин. Одним из наиболее распространенных типов электрических машин в промышленности является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для решения задачи наблюдения механических координат асинхронных электроприводов широко используются методы, основанные на математических моделях этих машин. Среди них особое место занимает наблюдатель Люенбергера, который позволяет оценивать как электрические, так и механические параметры электропривода на основе измерения ограниченного числа доступных переменных.

В данной статье рассматривается косвенный способ определения объемного расхода жидкости насосной установки без противодавления с асинхронным электроприводом, через легкодоступные для прямого измерения координаты тока и напряжения. Данные координаты в электроприводах с частотным регулированием измеряются, в том числе для управления работой силовых преобразователей, в переходных и установившихся режимах [7–9].

Центробежный насос с асинхронным электроприводом представляет собой объект с несколькими физическими подсистемами: электрической, механической и гидравлической.

Электрическая подсистема представляет собой асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, получающий питание от источника трехфазного переменного напряжения. Асинхронный электродвигатель с двойной беличьей клеткой в неподвижной системе координат можно описать следующей системой (1):

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + k_{IS} \frac{di_{S\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + k_{IS} \frac{di_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\alpha} + Z_p \omega_m \psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\beta} - Z_p \omega_m \psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R2\alpha} + \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\alpha} + Z_p \omega_m \psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R2\beta} + \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\beta} - Z_p \omega_m \psi_{R2\alpha} \\ T_E = \frac{3}{2} Z_p k_{R2} (\psi_{R1\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R1\beta} i_{S\alpha}) + \frac{3}{2} Z_p k_{R1} (\psi_{R2\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R2\beta} i_{S\alpha}) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_E - T_L - T_0}{J} \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{S\alpha}$, $u_{S\beta}$, $i_{S\alpha}$, $i_{S\beta}$, $\psi_{R1\alpha}$, $\psi_{R1\beta}$, $\psi_{R2\alpha}$, $\psi_{R2\beta}$ — пространственные составляющие вектора напряжения, тока и потокосцепления ротора соответственно;

ω_m — частота вращения ротора;

J — суммарный момент инерции;

T_E — электромагнитный момент, развиваемый асинхронной машиной;

T_L — момент нагрузки центробежного насоса;

T_0 — момент трения.

Механическая подсистема связывает координаты гидравлической и электрической подсистем между собой.

Гидравлическая подсистема состоит из насоса, создающего давление, и трубопровода, подключён-

ного к напорному патрубку. При этом насос работает на гидравлическую сеть без противодействия. Потребляемая мощность на валу насоса определяется как полином второй степени (2):

$$N_{meh} = \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega_m} \right)^3 (A_0 - A_1 q - A_2 q^2), \quad (2)$$

где N_{meh} — мощность, потребляемая насосом;
 q — мгновенное значение расхода, развиваемого насосом (m^3/c);

A_0, A_1, A_2 — коэффициенты аппроксимации полинома второй степени.

Момент нагрузки, создаваемый насосом, тогда определится как (3):

$$T_L = \frac{N_{meh}}{\omega_m}. \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3), получим связь функции расхода с моментом нагрузки (4):

$$T_L = \frac{\left(\frac{\omega_{nom}}{\omega_m} \right)^3 (A_0 - A_1 q - A_2 q^2)}{\omega}. \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно q , получим два корня (5):

$$q_{1,2} = \frac{- \left(A_1 \omega_m \pm \sqrt{A_1^2 \omega_m^2 + 4A_2 T_L \omega_{nom}^3 - 4A_0 A_2 \omega_m^2} \right)}{2A_2 \omega_m}. \quad (5)$$

Для определения значений момента нагрузки насоса и скорости вращения ротора применим наблюдатель Люенбергера [10–12] к математическому описанию асинхронной машины (1). Наблюдаемые величины в системе (1) являются ток статора асинхронной машины и напряжение питания. С учетом этого получим систему (6):

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S \hat{i}_{S\alpha} + k_{iS} \frac{d\hat{i}_{S\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\hat{\psi}_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\hat{\psi}_{R2\alpha}}{dt} + k_{Ls} \Delta \hat{i}_{S\alpha} \\ u_{S\beta} = R_S \hat{i}_{S\beta} + k_{iS} \frac{d\hat{i}_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\hat{\psi}_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\hat{\psi}_{R2\beta}}{dt} + k_{Ls} \Delta \hat{i}_{S\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} \hat{i}_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \hat{\psi}_{R1\alpha} + \frac{d\hat{\psi}_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R2\alpha} + Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} \hat{i}_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \hat{\psi}_{R1\beta} + \frac{d\hat{\psi}_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R2\beta} - Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} \hat{i}_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \hat{\psi}_{R2\alpha} + \frac{d\hat{\psi}_{R2\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R1\alpha} + Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} \hat{i}_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \hat{\psi}_{R2\beta} + \frac{d\hat{\psi}_{R2\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \hat{\psi}_{R1\beta} - Z_p \hat{\omega}_m \hat{\psi}_{R2\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

где $\hat{\omega}_m$ — оценка угловой скорости,
 $\hat{i}_{S\alpha}, \hat{i}_{S\beta}, \hat{\psi}_{R1\alpha}, \hat{\psi}_{R1\beta}, \hat{\psi}_{R2\alpha}, \hat{\psi}_{R2\beta}$ — оценки проекций пространственных векторов тока статора и потоков сцеплений ротора соответственно;

$\Delta \hat{i}_{S\alpha} = i_{S\alpha} - \hat{i}_{S\alpha}; \Delta \hat{i}_{S\beta} = i_{S\beta} - \hat{i}_{S\beta}$ — невязки токов статора;

k_{Ls} — коэффициент усиления невязок тока.

Наблюдатель момента нагрузки представляет собой алгебраическую сумму пропорциональной и интегральной и дифференциальной составляющих

произведений невязок тока и соответствующих составляющих потокосцеплений ротора (7).

$$\begin{cases} \hat{T}_E = \frac{3}{2} Z_p k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \hat{i}_{S\alpha}) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \hat{i}_{S\alpha}) \\ T_{LP} = K_{Tmp} [k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha})] \\ T_{LI} = \frac{K_{Tmi}}{p} [k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha})] \\ T_{LD} = p K_{Tmd} [k_{R2} (\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha}) + k_{R1} (\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta \hat{i}_{S\alpha})] \\ \hat{T}_L = \frac{3}{2} Z_p (T_{LP} + T_{LI} + T_{LD}) \\ \hat{\omega}_m = \frac{\hat{T}_E - \hat{T}_L}{Jp} \end{cases} \quad (7)$$

где \hat{T}_L — оцененные значения момента нагрузки насоса.

Структурная схема, реализующая уравнения (6, 7), представлена на рис. 1.

Наблюдаемый объемный расход с учетом (5, 7) тогда можно записать как (8):

$$\hat{q} = \frac{-A_1 \hat{\omega}_m \pm \sqrt{A_1^2 \hat{\omega}_m^2 + 4A_2 (\hat{T}_L - T_0) \omega_{nom}^3 - 4A_0 A_2 \hat{\omega}_m^2}}{2A_2 \hat{\omega}_m}. \quad (8)$$

Для уменьшения пульсаций наблюдаемого расхода в качестве фильтра было применено аperiodическое звено. С учетом этого выражение (8) можно представить в следующем виде (9):

$$\hat{q} = \frac{1}{T_q p + 1} \frac{-A_1 \hat{\omega}_m \pm \sqrt{A_1^2 \hat{\omega}_m^2 + 4A_2 (\hat{T}_L - T_0) \omega_{nom}^3 - 4A_0 A_2 \hat{\omega}_m^2}}{2A_2 \hat{\omega}_m}, \quad (9)$$

где T_q — постоянная времени фильтра.

Имитационное моделирование. Для исследования режимов работы наблюдателя в среде Simintech были использованы имитационные модели (рис. 1–3). В качестве примера насосной установки был использован насосный агрегат мощностью 90 кВт и производительностью 200 $m^3/ч$. Математическое описание моделей соответствует системам дифференциальных уравнений (1–6).

Имитационная модель гидравлической подсистемы представлена на рис. 2. Структура имитационной модели, содержащая электрическую (AD2C) и механическую подсистемы, а также наблюдатель механических координат (HMK) и наблюдатель напора, представлены (Qobs) на рис. 3. Структура наблюдателя механических координат асинхронного электродвигателя с двойной беличьей клеткой в операторной форме представлена на рис. 1.

Поведение наблюдателя и всей динамической системы исследовалось при изменении частоты питающего напряжения и гидравлического сопротивления системы. Временные диаграммы изменения частоты питающего напряжения и гидравлической проводимости приведены на рис. 4. Доступный прямому измерению ток статора в виде действующего значения совместно с током ротора представлен на рис. 5. За эталонные значения были приняты выходные координаты модели электропривода при внешних возмущениях: угловая скорость, момент нагрузки, объемный расход (w, Tl, Q соответственно на рис. 6–8). Наблюдаемые значения координат угловой скорости ротора, момента нагрузки двига-

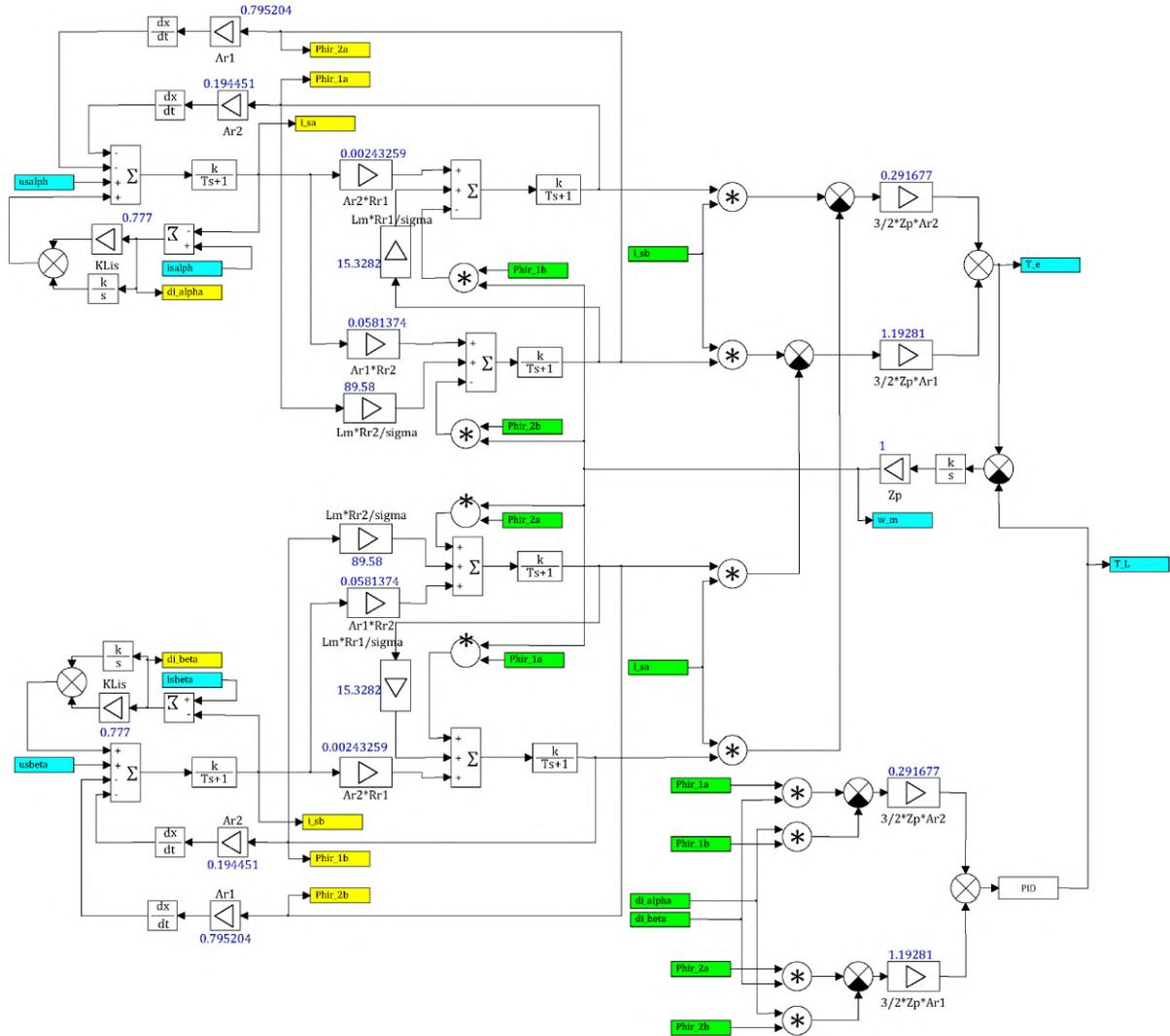


Рис. 1. Структурная схема наблюдателя механических координат

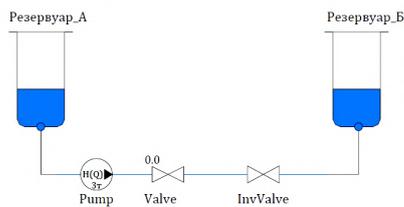


Рис. 2. Гидравлическая подсистема

теля и расхода насоса, также представлены на рис. 6–8 с обозначениями w^\wedge , T_I^\wedge и Q_I^\wedge соответственно.

Выводы. Проанализировав данные представленные на рис. 5–8, очевидно, что предложенный наблюдатель объемного расхода обладает устойчивостью в динамических режимах работы. Кривые тока статора и ротора представленные на рис. 5, показывают достаточно сильные динамические колебания при внешнем возмущении. Угловая ско-

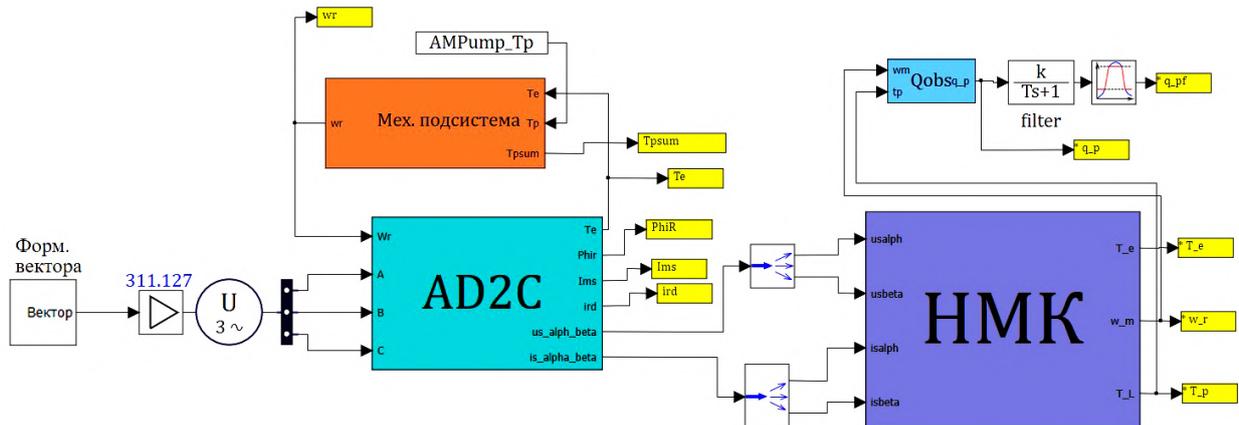


Рис. 3. Имитационная модель для испытания наблюдателя объемного расхода

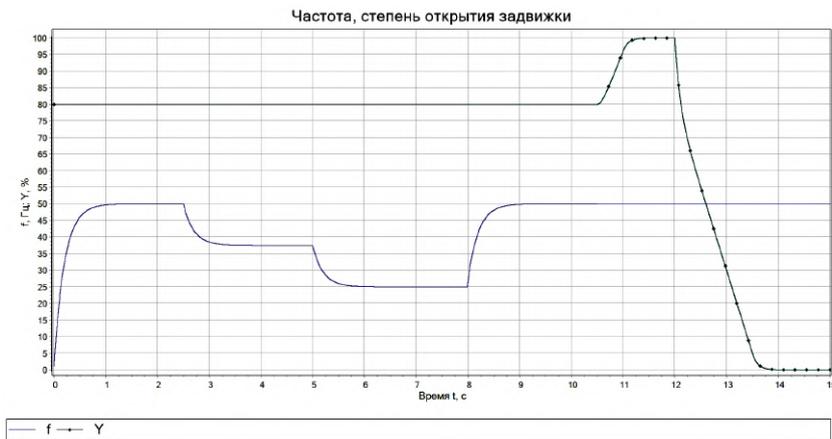


Рис. 4. График задающих воздействий на электропривод: частота и степень открытия задвижки напорного трубопровода

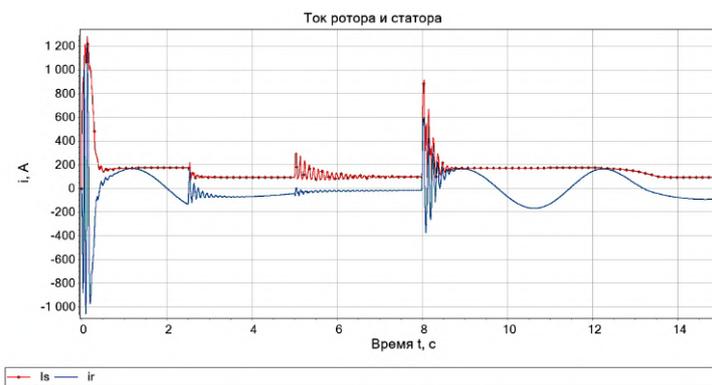


Рис. 5. График переходных процессов тока статора и ротора

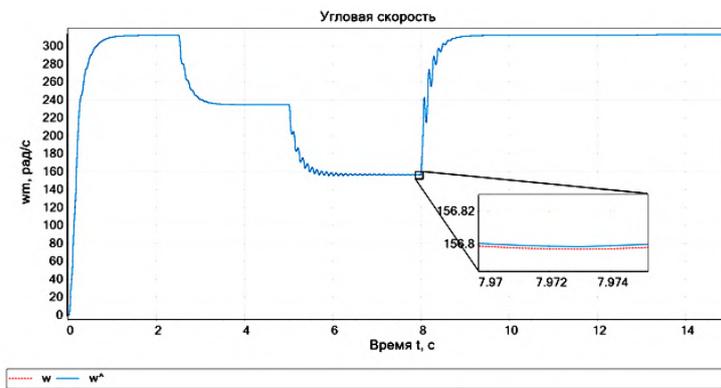


Рис. 6. График переходных процессов угловой скорости ротора асинхронного двигателя

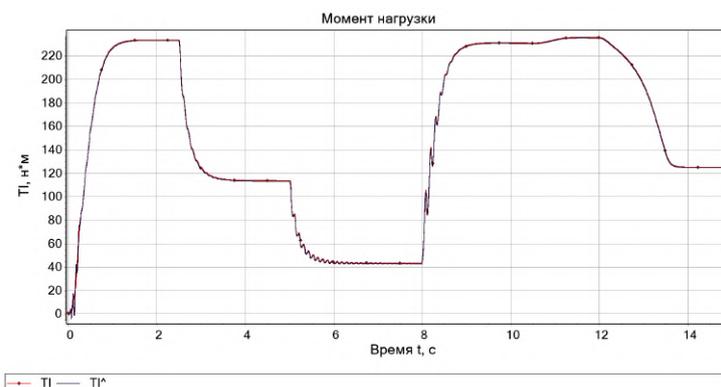


Рис. 7. График переходных процессов момента сопротивления насоса

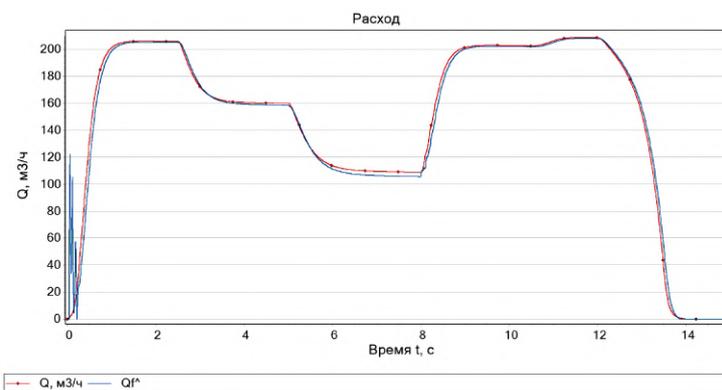


Рис. 8. График переходных процессов объемного расхода жидкости центробежного насоса (Q)

рость вращения ротора, определенная с помощью наблюдателя, незначительно отличается от эталонной (рис. 6).

Максимальная относительная погрешность, в динамике, при определении момента сопротивления составляет 5,5 %, в статике 1,01 % (рис. 7). Погрешность наблюдателя объемного расхода в динамике составляет 8,04 %, в установившемся режиме работы 3 % (без учета пуска и останова). Стоит отметить, что в реальных условиях эксплуатации, при реализации регуляторов в системе управления электропривода возмущающие воздействия, как правило, будут значительно меньше, что положительно скажется на точности работы наблюдателя объемного расхода, но данный вопрос требует отдельных исследований.

Библиографический список

1. Чернышева Т. А., Аникин В. В., Чернышев И. А., Чернышев А. Ю. Частотно-регулируемый электропривод центробежных насосных установок добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 12. С. 168–178. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2417. EDN: DLSLIX.
2. Милорадов В. А. Моделирование вентильного электропривода установки электроцентробежного насоса в неподвижной системе координат // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 435–439. EDN: FWJZDA.
3. Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Карницкий Н. Б. Перспективы установки частотно-регулируемого электропривода на циркуляционных насосах системы технического водоснабжения ТЭЦ // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 4 (52). С. 14–27. EDN: EUIRRC.
4. Yang R., Zhang M., Tarn T.-J. Adaptive backstepping control of a micro-needle micro-pump integrated insulin delivery system for diabetes care // 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO). 2007. P. 448–53. DOI: 10.1109/NANO.2007.4601229.
5. Иванова В. Р., Киселев И. Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 5. С. 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70. EDN: FJSXVL.
6. LaNasa P. J., Upp E. L. Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement. 3rd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014. 256 p. ISBN: 9780124095243; 978-0124095243.
7. Рожков В. В., Федотов В. В. Имитационное моделирование адаптивного идентификатора скорости асинхронного двигателя агломерационной машины // Прикладная информатика. 2022. Т. 17, № 6 (102). С. 36–55. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-36-55. EDN: FHSVTU.
8. Антипов А. С., Краснов Д. В. Синтез системы слежения для однозвенного бездатчикового манипулятора при воздействии негладких возмущений // Проблемы управления. 2022. № 3. С. 3–15. DOI: 10.25728/ru.2022.3.1. EDN: SUVQEX.
9. Bhaumik A., Das S. Virtual voltage vector based predictive current control of speed sensorless induction motor drives // ISA Transactions. Vol. 133 (6). 2023. P. 495–504. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.07.007.
10. Merrassi W. E., Abounada A., Ramzi M. Advanced speed sensorless control strategy for induction machine based on neuro-MRAS observer // Materials Today: Proceedings. Vol. 45. 2021. P. 7615–7621. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.081.
11. Lin-Shi X., Massioni P., Gauthier J.-Y. Estimation of inverter voltage disturbances for induction machine drive using LPV observer with convex optimization // Mathematics and Computers in Simulation. 2021. Vol. 184. P. 196–209. DOI: 10.1016/j.matcom.2020.06.004.
12. Ren Y., Wang R., Rind S. J. [et al.] Jiang Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer // Control Engineering Practice. 2022. Vol. 123. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105166.

ЛЫСЕНКО Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.
 SPIN-код: 4975-9193
 AuthorID (РИНЦ): 643928
 ORCID: 0000-0002-7924-5494
 AuthorID (SCOPUS): 5650338820
 ResearcherID: N-5528-2015
 Адрес для переписки: oalisenko@omgtu.ru

Для цитирования

Лысенко О. А. Наблюдатель расхода жидкости асинхронного электропривода центробежного насоса // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 100–107. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-100-107.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024 г.
 © О. А. Лысенко

FLUID FLOW OBSERVER FOR AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A CENTRIFUGAL PUMP

The article examines the development of a system for monitoring the volumetric supply of liquid in pumping units. The relevance of the research is due to the growing requirements for automation of control of pumping systems. The key element of the system is the observer, which allows evaluating the main parameters of the installation, such as the pump rotation speed and the moment of resistance. The electric drive of the pump uses an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, the rotation speed of which is controlled. The pressure in the discharge pipeline is created by a centrifugal pump. The observer is based on a model of an asynchronous motor in a fixed coordinate system, and the Luenberger observer is used to estimate the rotation speed and torque of the pump. To identify the volume flow, a centrifugal pump model is used, parameterized by a second-degree polynomial. The authors present simulation results showing the high accuracy of the developed observer, with an error of no more than 3% in steady state. The results demonstrate the effectiveness of the proposed approach for constructing a monitoring system for pumping units.

Keywords: flow identifier, asynchronous electric drive, Luenberger observer, centrifugal pump, double squirrel cage rotor, pumping unit.

References

1. Chernysheva T. A., Anikin V. V., Chernyshev I. A., Chernyshev A. Yu. Chastotno-reguliruyemyy elektropriwod tsentrobeznykh nasosnykh ustanovok dobychi nefi [Variable speed electric drive of centrifugal pump in oil lifting plants] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. Vol. 330, no. 12. P. 168–178. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2417. EDN: DLSLIX. (In Russ.).

2. Miloradov V. A. Modelirovaniye ventil'nogo elektropriroda ustanovki elektrosentrobzhnogo nasosa v nepodvizhnoy sisteme koordinat [Simulation of the permanent ma gnet synchronous motor electric drive of the electric submersible pump in a fixed coordinate system] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 2. P. 435–439. EDN: FWJZDA. (In Russ.).

3. Zenovich-Leshkevich-Ol'pinskiy Yu. A., Karnitskiy N. B. Perspektivy ustanovki chastotno-reguliruyemogo elektropriroda na tsirkulyatsionnykh nasosakh sistemy tekhnicheskogo vodosnabzheniya TETs [Prospects for frequency control installation electric drive on circulation pumps CHPP technical water supply systems] // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2021. Vol. 13, no. 4 (52). P. 14–27. EDN: EUIRRC. (In Russ.).

4. Yang R., Zhang M., Tam T.-J. Adaptive backstepping control of a micro-needle micro-pump integrated insulin delivery system for diabetes care // 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO). 2007. P. 448–53. DOI: 10.1109/NANO.2007.4601229. (In Engl.).

5. Ivanova V. R., Kiselev I. N. Chastotno-reguliruyemyy elektropriwod dlya energosberezheniya i optimizatsii

tekhnologicheskikh protsessov v elektrotekhnicheskikh kompleksakh [Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019. Vol. 21, no. 5. P. 59–70. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70. EDN: FJSXVL. (In Russ.).

6. LaNasa P. J., Upp E. L. Fluid Flow Measurement: A Practical Guide to Accurate Flow Measurement. 3rd ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2014. 256 p. ISBN 9780124095243; 978-0124095243. (In Engl.).

7. Rozhkov V. V., Fedotov V. V. Imitatsionnoye modelirovaniye adaptivnogo identifikatora skorosti asinkhronnogo dvigatelya aglomeratsionnoy mashiny [Simulation modeling of the adaptive speed identifier of an induction motor of a sintering machine] // *Prikladnaya informatika. Journal of Applied Informatics*. 2022. Vol. 17, no. 6 (102). P. 36–55. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-36-55. EDN: FHSVTU. (In Russ.).

8. Antipov A. S., Krasnov D. V. Sintez sistemy slezheniya dlya odnozvennogo bezdatchkovogo manipulyatora pri vozdeystvii negladkikh vozmushcheniy [Tracking system design for a single-link sensorless manipulator under nonsmooth disturbances] // *Problemy upravleniya. Problemy Upravleniya*. 2022. No. 3. P. 3–15. DOI: 10.25728/pu.2022.3.1. EDN: SUVQEX. (In Russ.).

9. Bhaumik A., Das S. Virtual voltage vector based predictive current control of speed sensorless induction motor drives // *ISA Transactions*. Vol. 133 (6). 2023. P. 495–504. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.07.007. (In Engl.).

10. Merrassi W. E., Abounada A., Ramzi M. Advanced speed sensorless control strategy for induction machine based on neuro-MRAS observer // *Materials Today: Proceedings*. Vol. 45. 2021. P. 7615–7621. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.081. (In Engl.).

11. Lin-Shi X., Massioni P., Gauthier J.-Y. Estimation of inverter voltage disturbances for induction machine drive using

LPV observer with convex optimization // Mathematics and Computers in Simulation. 2021. Vol. 184. P. 196–209. DOI: 10.1016/j.matcom.2020.06.004. (In Engl.).

12. Ren Y., Wang R., Rind S. J. [et al.] Jiang Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer // Control Engineering Practice. 2022. Vol. 123. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105166. (In Engl.).

LYSENKO Oleg Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.
SPIN-code: 4975-9193

AuthorID (RSCI): 643928

ORCID: 0000-0002-7924-5494

AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ResearcherID: N-5528-2015

Correspondence address: oalisenko@omgtu.ru

For citations

Lysenko O. A. Fluid flow observer for an asynchronous electric drive of a centrifugal pump // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 100–107. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-100-107.

Received May 27, 2024.

© O. A. Lysenko



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 544.174.6:666.223.9:681.7.068
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-108-116
EDN: GYUTJM

И. В. БОГАЧКОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В РАЗНОВИДНОСТЯХ ЭРБИЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В этой работе представлены результаты тестирования параметров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для нескольких видов оптических волокон, легированных ионами эрбия и церия. Приведены полученные бриллюэновские рефлектограммы разных типов. Представлены частотные характеристики бриллюэновского рассеяния. Сделаны оценки начальных значений бриллюэновского частотного сдвига и поведения рефлектограмм уровня обратно отраженного сигнала для исследованных разновидностей волокон. Проведён сравнительный анализ полученных параметров различных видов эрбиевых оптических волокон.

Ключевые слова: рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, бриллюэновская рефлектометрия, эрбиевое оптическое волокно, оптическое волокно с добавлением эрбия и церия, профиль спектра бриллюэновского рассеяния, бриллюэновский частотный сдвиг, классификация волокон.

Введение. Состав разработчиков оптических волокон (ОВ) и поставщиков оптических материалов, используемых при производстве ОВ, оптических устройств и оптических кабелей (ОК), в Российской Федерации после введения санкций существенно изменился [1–8].

ОВ, в котором сделано легирование ионами эрбия различной концентрации (эрбиевое ОВ — EDF), широко используется в оптических (эрбиевых) усилителях (EDFA) [1–4]. Разновидности таких усилителей являются важнейшим элементом подводных

и наземных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), в том числе с волновым (спектральным) разделением каналов (WDM), большой протяжённости [2, 6–10].

Для придания ОВ-EDF свойств устойчивости к действию радиационных воздействий проводят дополнительное легирование ионами церия (EcDF) с концентрацией различной степени [2, 10–12].

Метод бриллюэновской рефлектометрии применяется для раннего обнаружения в волокнах ВОЛС участков с потенциально опасным натяжением.

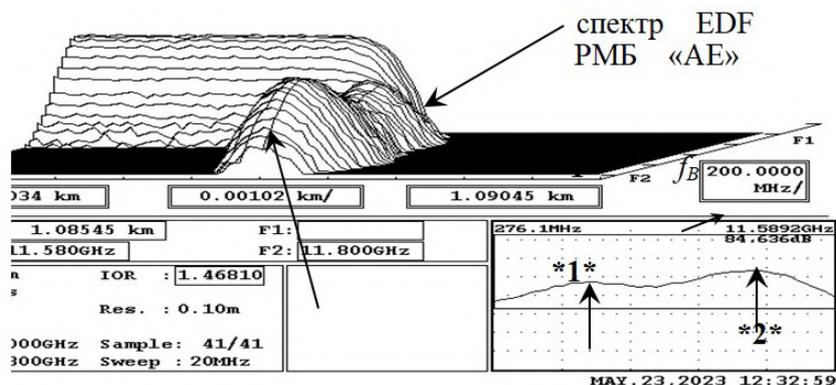


Рис. 1. 3D-BOTDR-рефлектограмма

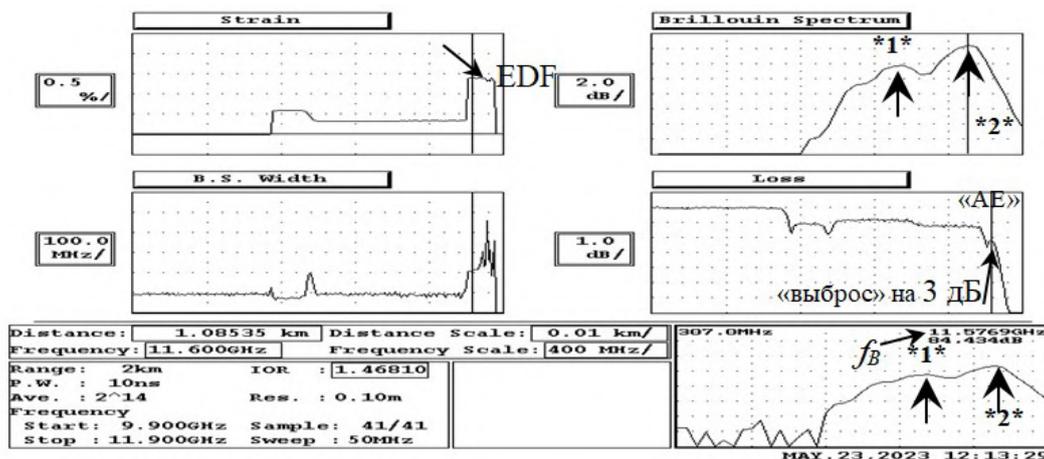


Рис. 2. BOTDR-мультирефлектограмма

Этот метод базируется на исследовании в волокне спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (СРМБ) и определения бриллюэновского частотно-сдвига (БЧС) [3–10]. Для этого следует использовать бриллюэновский рефлектометр (BOTDR).

Поскольку в ОВ-EDF разных видов (например, при разных производителях, при отличающихся концентрациях и составах легирующих добавок и т. п.) могут наблюдаться заметные изменения параметров рассеяния Манделъштама–Бриллюэна (РМБ) и их частотных зависимостей, необходимо получить BOTDR-рефлектограммы при различных продольных и поперечных механических воздействиях, при разных уровнях тестирующего сигнала на входе ОВ, при температурных изменениях и т. п. [10–14].

В статьях [2, 10–12] уже были представлены результаты ранее проведённых автором исследований характеристик (величины БЧС, графики зависимостей РМБ от частоты) некоторых типов EDF различной длины [11, 12], при разных составах и концентрации примесных добавок.

Постановка задачи. Для всех тестируемых типов ОВ-EDF для исследования параметров РМБ (снятия частотных спектров РМБ, вычисления величин БЧС и т. п.) необходимо получить BOTDR-рефлектограммы.

При содействии сотрудников ЗАО «Москабель–Фуджикура» с помощью BOTDR «Ando AQ 8603» были проведены тестирования ОВ-EDF при различной степени концентрации эрбия и церия, которые были предоставлены сотрудниками Пермского федерального исследовательского центра.

Результаты исследований. В каждом эксперименте первой (в качестве нормализующей катушки, длина — более 1 км) подключается ОВ-G.652 (обычное одномодовое ОВ, рекомендация G.652), а далее — тестируемое волокно.

Под «нормальными условиями» понимается отсутствие механических воздействий на тестируемое ОВ, которое имеет комнатную температуру.

3D-BOTDR-рефлектограмма (пространственное распределение спектра РМБ) для ОВ в EDF разновидности «АЕ» приведена на рис. 1. Значение БЧС (f_B) и график СРМБ указаны в правом нижнем углу рефлектограммы.

На рис. 2 для эрбиевого ОВ марки «АЕ» показана мультирефлектограмма, соответствующая 3D-распределению спектра РМБ, приведённому на рис. 1, — зависимости ширины СРМБ («B. S. Width»), профиля СРМБ («Brillouin Spectrum»), натяжения («Strain») и уровня обратно отражённого сигнала («Loss»), с указанием характерных участков вдоль тестируемого соединения участков оптических волокон.

Во всех экспериментальных исследованиях была установлена минимальная длительность тестирующего импульса (10 нс) бриллюэновского рефлектометра, которая позволила получить максимальную реальную разрешающую способность измерения (порядка 1 м по расстоянию).

На графиках зависимостей по длине световода ярко выделяются места соединений ОВ разных типов.

На графике «Loss» в начале эрбиевого ОВ хорошо заметен «выброс» на +3 дБ. Однако для ОВ-

EDF длиной более 3 м далее по длине световода мы наблюдаем явное и резкое падение уровня обратно отражённого сигнала. Из-за этого не будут отображаться на рефлектограммах сигналы от других секций ОВ, которые в световоде будут находиться далее (после ОВ-EDF).

Данный эффект позволяет отличать эрбиевые и эрбиево-цериевые волокна от других разновидностей ОВ [2, 10–12].

Подобные эффекты у других (не эрбиевых) волокон не были обнаружены («подъёмы» на графиках уровня обратно отраженного сигнала наблюдались только при нагревании участков волокон) [2, 10–17].

Значение БЧС для эрбиевого ОВ марки «АЕ» при нормальных условиях составляет 11,6 ГГц. При этом оно находится на втором «пике», а не как у большинства ОВ на первом «пике», который наблюдается на частоте 11,2 ГГц.

Большой уровень второго «пика» по сравнению с первым наблюдается весьма редко. Подобные эффекты ранее обнаруживались только в волокнах со значительной концентрацией фтора в сердечнике ОВ [13–20].

Изменения параметров РМБ (в частности, БЧС) в зависимости от состава и преимущественной концентрации легирующих веществ различных типов (фтора, оксидов алюминия, германия, фосфора и добавок других видов) ранее обсуждались в работах [1–3, 5, 8–10].

Для сравнения: у ОВ-G.652 БЧС находится в пределах от 10,82 ГГц до 10,85 ГГц, имеется один ярко выраженный максимум, а подъёма уровня на графике обратно отражённого сигнала не наблюдается.

Исследования влияния распространенных легирующих веществ на оптические и акустические параметры ОВ, связанные с характеристиками РМБ, показали, что существуют легирующие добавки, которые с ростом концентрации повышают как оптический показатель преломления, так и акустический (GeO_2 , P_2O_5 , TiO_2 и т. п.) [1–3, 5].

Иные легирующие вещества (Y_2O_3 и Al_2O_3) снижают акустический показатель преломления, но повышают оптический [1, 5].

Есть и примеси, которые понижают оптический показатель преломления, но повышают акустический (B_2O_3 и F) [1, 5].

Поведение основной оптической моды (в одномодовых ОВ только она и учитывается) можно описать уравнением (1):

$$\frac{\partial^2 F(r)}{\partial r^2} + \frac{\partial F(r)}{r \partial r} + \left(\frac{\omega_L^2 n(r)}{c^2} - \beta_L^2 \right) F(r) = 0. \quad (1)$$

Для основной оптической моды $F(r)$ при двухступенчатой структуре профиля $n(r)$ можно определить по формуле:

$$F(r) = \begin{cases} C_0 J_0(ur) & \text{при } r \leq a, \\ C_0 J_0(au) K_0(wr) / K_0(aw) & \text{при } a < r < b, \end{cases} \quad (2)$$

где C_i — некоторые константы, $u = \sqrt{(n_i^2 \omega_L^2 / c^2 - \beta^2)}$, $w = \sqrt{(\beta^2 - n_{ог}^2 \omega_L^2 / c^2)}$, J_0 и N_0 — обыкновенные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка, I_0 и K_0 — модифицированные функции Бесселя нулевого порядка первого и второго рода соответственно.

При заданной структуре тестируемых ОВ необходимо выявить характеристики акустических мод, что позволит для проходящего оптического сигнала в итоге определить частотные и амплитудные параметры РМБ [1].

Эквивалентная площадь акустооптического взаимодействия гипер акустической моды m -го порядка (A_{Am} — акустооптическая эффективная площадь) и эффективная оптическая площадь ($A_{эфф}$) может быть вычислена по таким формулам:

$$A_{Am} = \left(\frac{\langle F^2(r) \rangle}{\langle F^2(r) \cdot \xi_m(r, \phi) \rangle} \right)^2 \langle \xi_m^2(r, \phi) \rangle, \quad (3)$$

$$A_{эфф} = \frac{\langle F^2(r) \rangle^2}{\langle F^4(r) \rangle},$$

где $F(r)$ — распределение амплитуды основной оптической моды одномодового ОВ, а $\xi_m(r, \phi)$ — распределение амплитуды акустической моды m -го порядка по поперечному сечению ОВ.

Вычисляемые величины усредняются по поперечному сечению ОВ, что отражается в представлении «угловыми» скобками. Распределение эквивалентной акустооптической площади по поперечному сечению ОВ задаёт характер акустооптического взаимодействия, влияет на значение пороговой мощности вынужденного РМБ в ОВ и является важным показателем, определяющим характеристики РМБ.

Комбинируя слои волокон различных по составу, различной концентрации толщины слоёв и т. п., возможно изменять характеристики РМБ в значительных интервалах:

$$n = 1,458(1 + 1,0 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 3,3 \cdot 10^{-3} w_F),$$

$$\rho = 2200(1 + 6,4 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 3,4 \cdot 10^{-3} w_F),$$

$$v_{Az} = 5,944(1 - 7,2 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 2,7 \cdot 10^{-2} w_F),$$

$$v_{Ar} = 3,749(1 - 6,4 \cdot 10^{-3} w_{GO} - 2,7 \cdot 10^{-2} w_F), \quad (4)$$

где v_{Az} — продольная гипер акустическая скорость (км/с), v_{Ar} — поперечная (сдвиговая) гипер акустическая скорость (км/с), w_{GO} — концентрация (в %) оксида германия (GeO_2), w_F — концентрация (в %) фтора [1–5].

Таким образом, в волокнах различных типов и разных изготовителей различия в частотных и (для волокон, легированных эрбием, а также эрбием с примесью церия различных концентраций) амплитудных характеристиках РМБ позволяют выявить существенные отличия, что позволит (с учётом формул (1)–(3) аппарата анализа РМБ и построения частотных характеристик РМБ) осуществить автоматизированную классификацию типа ОВ.

Если EDF «АЕ» нагреть до температуры +70 °С, то наблюдается смещение спектра РМБ в сторону повышения частоты, и БЧС составит 11,63 ГГц, при этом положение первого «пика» будет 11,27 ГГц.

При температурных изменениях наблюдается линейная зависимость БЧС от температуры. При этом также наблюдаются смещения на графике уровня обратно отражённого сигнала: подъём характеристики при нагреве и спад при охлаждении участка волокна [1].

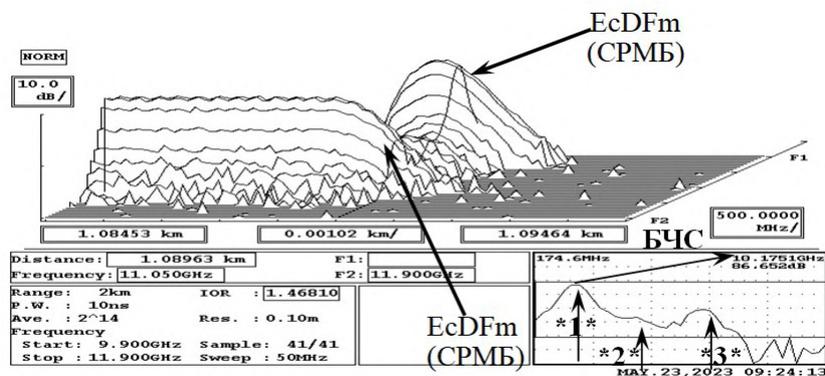


Рис. 3. 3D-BOTDR-рефлектограмма при малой концентрации церия в OB-EcDF (EcDFm)

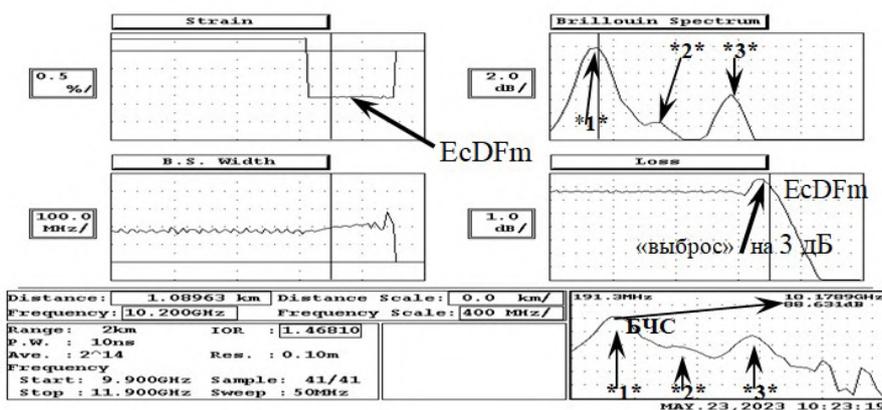


Рис. 4. BOTDR-мультирефлектограмма при малой концентрации церия (EcDFm)

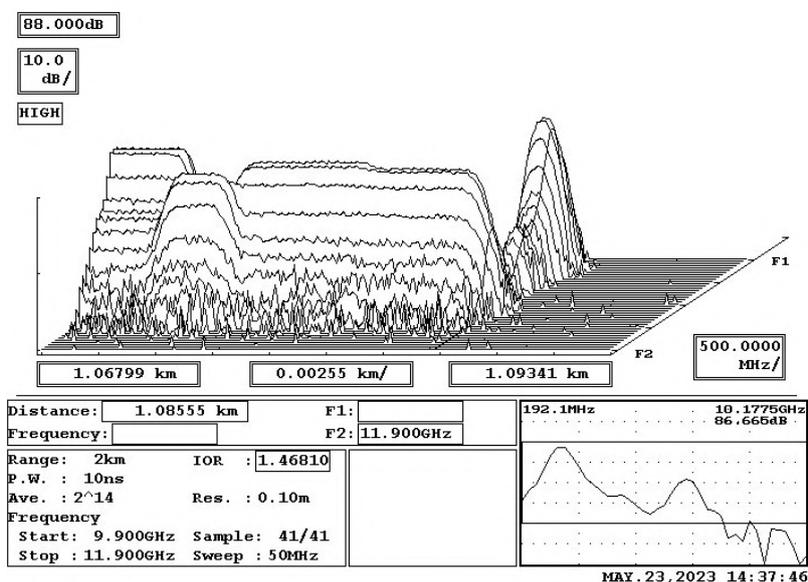


Рис. 5. Пространственное распределение спектра РМБ в EcDF при повышенной концентрации церия (EcDFb)

Это позволяет различать изменения БЧС, вызванные продольным механическим натяжением («Strain»), от смещения БЧС из-за температурных изменений, поскольку описанного выше подъёма характеристики уровня обратно отражённого сигнала при нагреве OB не наблюдается [1, 2].

На рис. 3 показана 3D-рефлектограмма распределения спектра РМБ для OB-EcDF при малой концентрации церия (EcDFm) при нормальных услови-

ях. В правом нижнем углу (рис. 3) показан профиль спектра РМБ и величина БЧС.

Частотная характеристика РМБ EcDFm имеет «главный максимум» (БЧС), который обнаруживается на частоте 10,18 ГГц. Следует отметить, что при этом наблюдаются побочные «выбросы»: второй (практически незаметный) — на частоте 10,60 ГГц и третий (средний по уровню, примерно на 7 дБ меньше основного) — на частоте 11,05 ГГц.

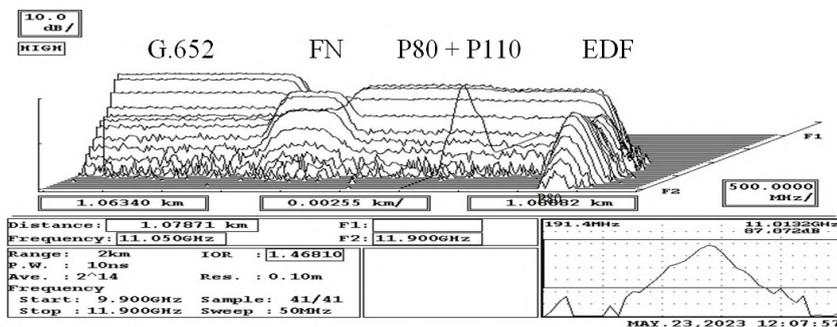


Рис. 6. 3D-BOTDR-рефлектограмма CPMB для световода с эрбиевым ОВ на конце

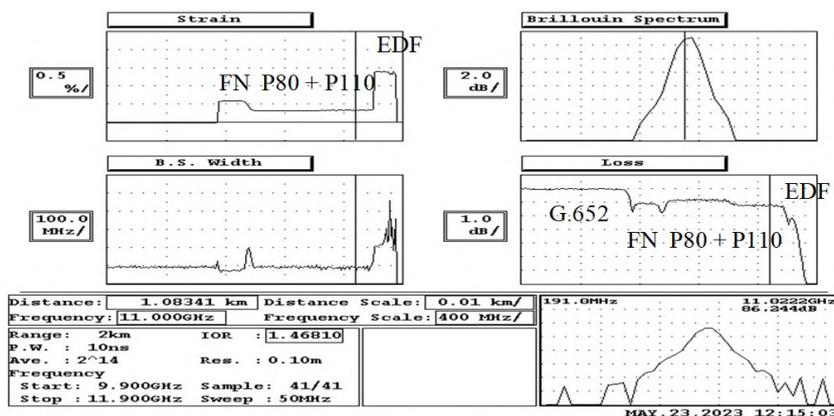


Рис. 7. Бриллюэновская мультирефлектограмма для световода с эрбиевым ОВ на конце

На рис. 4 для волокна EcDFm приведена полученная мультирефлектограмма, соответствующая 3D-распределению спектра РМБ, представленному с указанием характерных участков и положения БЧС на рис. 3.

Если EcDFm нагреть до температуры $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, то наблюдается смещение спектра РМБ в сторону повышения частоты, и БЧС составит 10,21 ГГц, при этом положение третьего «пика» будет 11,10 ГГц.

3D-BOTDR-рефлектограмма ОВ EcDF при повышенной концентрации церия (EcDFb) приведена на рис. 5.

Частотная характеристика EcDFb имеет «главный максимум», который обнаруживается на частоте 10,19 ГГц (БЧС). Следует отметить, что при этом наблюдаются побочные «выбросы»: второй (малозаметный) — на частоте 10,7 ГГц и третий (средний по уровню, примерно на 8 дБ меньше основного) — на частоте 11,1 ГГц.

На рис. 6 представлена 3D-BOTDR-рефлектограмма CPMB вдоль световода (G.652 — нормализующая катушка; остальные ОВ G.654: «Fujikura nature» (сокращённое обозначение — «FN»), «Fujikura Pure Advance 80» (сокращённое обозначение — «P80») и «Fujikura Pure Advance 110» (сокращённое обозначение — «P110»), — и в самом конце световода (как «поглотитель» остаточного сигнала) — эрбиевое волокно — «EDF»).

На рис. 7 представлена бриллюэновская мультирефлектограмма, соответствующая распределению спектральных характеристик РМБ.

Из рис. 6 и рис. 7 видно, что при проведении измерений отрезок эрбиевого ОВ (при длине более 3 метров) на конце тестируемого световода выполняет роль поглотителя сигнала.

Излучение от лазерного источника (длина волны BOTDR составляет 1,55 мкм) стремительно (по длине ОВ) поглощается в эрбиевом ОВ, как излучение накачки (хотя для него оптимальные длины волн выбираются другими, и усиление оптического сигнала наблюдается именно на длине волны, равной 1,55 мкм), и это приводит к некоторому усилению уровня обратно отражённого сигнала на самых первых метрах эрбиевого ОВ.

Усиление на частотах основного сигнала в эрбиевых ОВ происходит благодаря дополнительно вводимому в это ОВ излучению накачки, которое имеет другие оптимальные диапазоны длин волн, возбуждающие ионы эрбия.

В результате физических процессов наблюдается существенное усиление передаваемого информационного оптического сигнала [10–12].

Изменения уровня мощности тестирующего сигнала, вводимого в эрбиевое ОВ, — как при увеличении, так и при уменьшении мощности, — не приводят к принципиальным изменениям на графиках уровня обратно отраженного сигнала: графики сдвигаются по оси ординат («Loss»), но не изменяют характер зависимости от продольных координат световода, а также место и относительную величину «выброса».

На рис. 8 приведена развёрнутая зависимость уровня обратно отраженного сигнала вдоль световода, содержащего эрбиевое ОВ, при различных значениях мощности тестирующего сигнала, вводимого в исследуемый световод («Н» — «high» — повышенный, «N» — «normal» — нормальный, «L» — «low» — пониженный).

Следует отметить, что при повышенных мощностях сигнала на бриллюэновских рефлектограммах

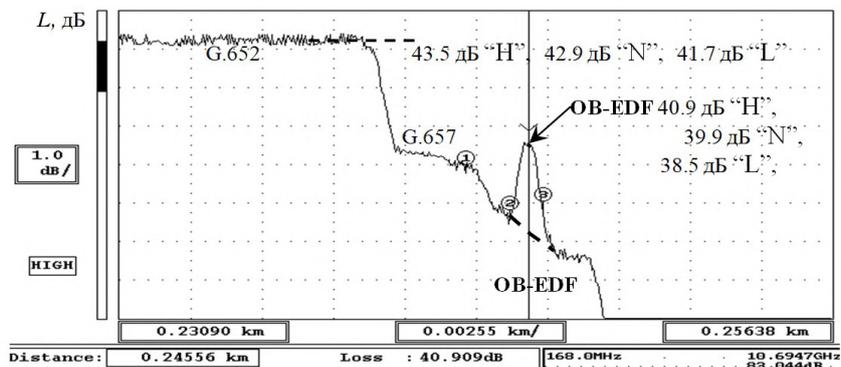


Рис. 8. Зависимость уровня обратно отраженного сигнала вдоль световода, содержащего эрбиевое ОБ, при различных значениях мощности тестирующего сигнала

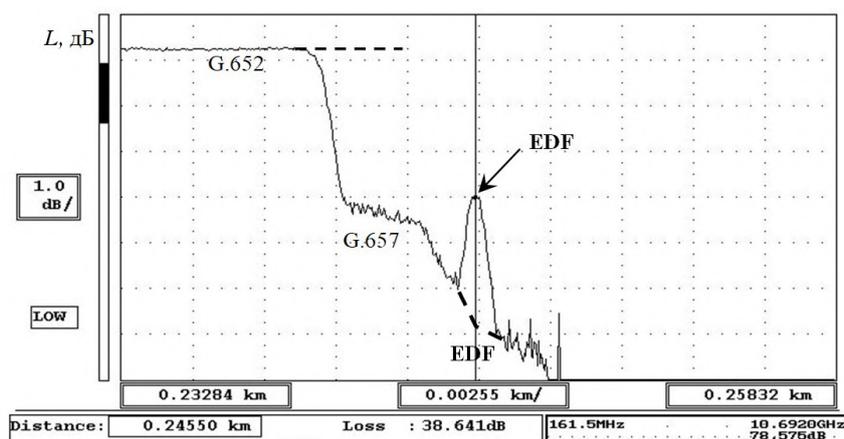


Рис. 9. График уровня обратно отраженного сигнала вдоль световода с EDF при пониженном значении мощности тестирующего сигнала на входе

Таблица 1

Значения БЧС и «пиков» СРМБ в ОБ при нормальных условиях

Тип EDF	Значения 1-го «пика» СРМБ, ГГц	Значения 2-го «пика» СРМБ, ГГц	Значения 3-го «пика» СРМБ, ГГц	БЧС (f_{B0}), ГГц
EcDFm	10,17 ... 10,18	(min) 10,60 ... 10,65	11,04 ... 11,05	10,18
EcDFb	10,18 ... 10,20	(min) 10,70	11,07 ... 11,10	10,19
EDF «АЕ»	11,20...11,22	(max!) 11,59...11,60	нет	11,59
EDF-01	10,69 ... 10,71	нет	нет	10,70
EDF-02	10,94 ... 10,96	нет	нет	10,95
EcDF-01	10,37 ... 10,39	11,10	нет	10,38
EDF-01	10,69 ... 10,71	нет	нет	10,70

могут проявляться эффекты, подобные «зашумлению» (начальные значения графика для ОБ-G.652 на участке 231 м–237 м). Однако это связано не с какими-либо помехами, а с нелинейными эффектами, ограничивающими реальный уровень сигнала в ОБ, которые проявляются при превышении пороговых значений для изучаемой разновидности ОБ, подобно входному сигналу в усилителе-ограничителе.

При нормальном уровне сигнала («N») эффект «зашумления» заметно уменьшается, а при пониженном уровне сигнала («L») — полностью исчеза-

ет (график становится «гладким»), что хорошо заметно на рис. 9 (на участке 232 м–237 м).

Обсуждение результатов. Значения «пиков» СРМБ для всех протестированных типов ОБ-EDF, а также некоторых других ОБ-EDF, исследованных автором ранее [1, 2, 10–12], приведены в табл. 1.

По полученным BOTDR-рефлектограммам можно снять частотные характеристики РМБ различных типов эрбиевых ОБ, а затем установить для каждой разновидности начальное значение (при нормальных условиях) БЧС (f_{B0}).

Выводы и заключение. На основе экспериментальных исследований с помощью ВOTDR-рефлектограмм были вычислены величины БЧС при нормальных условиях для всех протестированных типов эрбиевых волокон, а также определены их параметры РМБ.

Для автоматизации обработки ВOTDR-рефлектограмм и классификации разновидностей ОВ и можно использовать различия в частотных характеристиках РМБ и значениях БЧС.

Наличие «горба» («выброса») на графике «потерь» позволяет различать эрбиевые волокна от других разновидностей ОВ.

Изменения уровня мощности сигнала, вводимого в эрбиевое ОВ, не приводят к принципиальным изменениям на графиках уровня обратно отраженного сигнала.

При протяженности эрбиевого ОВ более 3 метров последующие ОВ в световоде не будут заметны на ВOTDR-рефлектограммах из-за поглощения тестирующего сигнала в EDF.

При измерениях отрезков эрбиевого ОВ длиной более 3 метров на конце тестируемого световода выполняет роль поглотителя сигнала.

Библиографический список

1. Богачков И. В. Определение разновидностей оптических волокон и ранняя диагностика их физического состояния на основе анализа характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116. EDN: XDUAQS.
2. Bogachkov I. V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm. 2017. Vol. 11, № 6. P. 59–63.
3. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // Optics Letters. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/ol.30.003123.
4. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // Instruments and experimental techniques. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067. EDN: UVUFPF.
5. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // Lightwave Technol. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007.
6. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh backscattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // Instruments and Experimental Techniques. 2023. Vol. 66 (5). P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172.
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // Instruments and Experimental Techniques. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268.
8. Kobayakov A., Sauer M., Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // Advances in Optics and Photonics. 2010. Vol. 2 (1). P. 1–59. DOI: 10.1364/AOP.2.000001.
9. Bao X., Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 4152–4187. DOI: 10.3390/s110404152.
10. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Gorlov N. I. The study of the Mandelstam–Brillouin scattering in erbium optical fibers //

Systems of signals generating and processing in the field of onboard communications – Proceedings. Moscow, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706720. EDN: PXJTGI.

11. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter features in the erbium-doped optical fiber // 14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2018): Proceedings. In 8 vols. Novosibirsk, 2018. Vol. 1, Part 1. P. 322–326. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545024. EDN: MBEXYM.

12. Bogachkov I. V. The experimental researches of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // T-comm. 2019. Vol. 13, № 4. P. 70–75.

13. Tartara L., Codemard C., Maran J. [et al.]. Full Modal Analysis of the Brillouin Gain Spectrum of an Optical Fiber // Optics Communications. 2009. Vol. 282 (2). P. 2431–2436. DOI: 10.1016/j.optcom.2009.03.012.

14. Dragic P. D. Estimating the effect of Ge doping on the acoustic damping coefficient via a highly Ge-doped MCVD silica fiber // Journal of the Optical Society of America B. 2009. Vol. 26 (8). P. 1614–1620. DOI: 10.1364/JOSAB.26.001614.

15. Law P.-C., Liu Y.-Sh., Croteau A., Dragic P. D. Acoustic coefficients of P₂O₅-doped silica fiber: acoustic velocity, acoustic attenuation, and thermo-acoustic coefficient // Optical Materials Express. 2011. Vol. 1, № 4. P. 686–699. DOI: 10.1364/OME.1.000686.

16. Zou W., He Z., Hotate K. Experimental study of Brillouin scattering in fluorine-doped single-mode optical fibers // Optics Express. 2008. Vol. 16. P. 18804–18812. DOI: 10.1364/OE.16.018804.

17. Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // Sensors 2022. Vol. 22, № 1033. DOI: 10.3390/s22031033.

18. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // Fibers. 2020. Vol. 8, № 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060.

19. Afshar S., Kalosha V. P., Bao X., Chen L. Enhancement of stimulated Brillouin scattering of higher-order acoustic modes in single-mode optical fiber // Optics Letters. 2005. Vol. 30 (20). P. 2685–2687. DOI: 10.1364/OL.30.002685.

20. Park K., Jeong Y. A quasi-mode interpretation of acoustic radiation modes for analyzing Brillouin gain of acoustically antiguiding optical fibers // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 7. P. 2–13. DOI: 10.1364/OE.22.007932.

БОГАЧКОВ Игорь Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 7115-6052

AuthorID (РИНЦ): 276415

ORCID: 0000-0002-7019-1784

AuthorID (SCOPUS): 3699775670

ResearcherID: A-7770-2015

Адрес для переписки: bogachkov@mail.ru

Для цитирования

Богачков И. В. Анализ характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в разновидностях эрбиевых оптических волокон // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 108–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-108-116.

Статья поступила в редакцию 07.09.2024 г.

© И. В. Богачков

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTERING IN VARIETIES OF ERBIUM OPTICAL FIBERS

The research presents the results of testing the Mandelstam–Brillouin scattering parameters for several types of optical fibers doped with erbium and cerium ions. The obtained Brillouin reflectograms of different types are shown. The frequency characteristics of Brillouin scattering are drawn. Estimates of the initial values of the Brillouin frequency shift and the behavior of the reflectograms of the back reflected signal level for the studied fiber varieties are presented. A comparative analysis of the obtained parameters of various types of erbium optical fibers is carried out.

Keywords: Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum, Brillouin reflectometry, erbium optical fiber, optical fiber with addition of erbium and cerium, Brillouin spectrum profile, Brillouin frequency shift, classification of fibers.

References

1. Bogachkov I. V. Opredeleniye raznovidnostey opticheskikh volokon i rannaya diagnostika ikh fizicheskogo sostoyaniya na osnove analiza kharakteristik rasseyaniya Mandel'shtama–Brillyuena [Determination of optical fiber varieties and early diagnosis of their physical condition based on the analysis of Mandelstam–Brillouin backscatter parameters] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 107–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-107-116. EDN: XDUAQS. (In Russ.).
2. Bogachkov I. V. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm. 2017. Vol. 11, no. 6. P. 59–63. (In Engl.).
3. Ruffin A. B., Li M.-J., Chen X. [et al.]. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices // Optics Letters. 2005. Vol. 30 (23). P. 3123–3125. DOI: 10.1364/ol.30.003123. (In Engl.).
4. Krivosheev A. I., Konstantinov Y. A., Barkov F. L. [et al.]. Comparative analysis of the Brillouin frequency shift determining accuracy in extremely noised spectra by various correlation methods // Instruments and experimental techniques. 2021. Vol. 64 (5). P. 715–719. DOI: 10.1134/S0020441221050067. EDN: UVUFPF. (In Engl.).
5. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S. [et al.]. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers // Lightwave Technol. 2004. Vol. 22 (2). P. 631–639. DOI: 10.1109/JLT.2003.822007. (In Engl.).
6. Belokrylov M. E., Claude D., Konstantinov Y. A. [et al.]. Method for increasing the signal-to-noise ratio of Rayleigh back-scattered radiation registered by a frequency domain optical reflectometer using two-stage erbium amplification // Instruments and Experimental Techniques. 2023. Vol. 66 (5). P. 761–768. DOI: 10.1134/S0020441223050172. (In Engl.).
7. Krivosheev A. I., Barkov F. L., Konstantinov Y. A. [et al.]. State-of-the-Art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing // Instruments and Experimental Techniques. 2022. Vol. 65 (5). P. 687–710. DOI: 10.1134/S0020441222050268. (In Engl.).
8. Kobyakov A., Sauer M., Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // Advances in Optics and Photonics. 2010. Vol. 2 (1). P. 1–59. DOI: 10.1364/AOP.2.000001. (In Engl.).
9. Bao X., Chen L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 4152–4187. DOI: 10.3390/s110404152. (In Engl.).
10. Bogachkov I. V., Trukhina A. I., Gorlov N. I. The study of the Mandelstam–Brillouin scattering in erbium optical fibers // Systems of signals generating and processing in the field of onboard communications – Proceedings. Moscow, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706720. EDN: PXJTGI. (In Engl.).
11. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter features in the erbium-doped optical fiber // 14th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2018): Proceedings. In 8 vols. Novosibirsk, 2018. Vol. 1, Part 1. P. 322–326. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545024. EDN: MBEXYM. (In Engl.).
12. Bogachkov I. V. The experimental researches of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics in erbium optical fibers of various kinds // T-comm. 2019. Vol. 13, no. 4. P. 70–75. (In Engl.).
13. Tartara L., Codemard C., Maran J. [et al.]. Full Modal Analysis of the Brillouin Gain Spectrum of an Optical Fiber // Optics Communications. 2009. Vol. 282 (2). P. 2431–2436. DOI: 10.1016/j.optcom.2009.03.012. (In Engl.).
14. Dragic P. D. Estimating the effect of Ge doping on the acoustic damping coefficient via a highly Ge-doped MCVD silica fiber // Journal of the Optical Society of America B. 2009. Vol. 26 (8). P. 1614–1620. DOI: 10.1364/JOSAB.26.001614. (In Engl.).
15. Law P.-C., Liu Y.-Sh., Croteau A., Dragic P. D. Acoustic coefficients of P₂O₅-doped silica fiber: acoustic velocity, acoustic attenuation, and thermo-acoustic coefficient // Optical Materials Express. 2011. Vol. 1, no. 4. P. 686–699. DOI: 10.1364/OME.1.000686. (In Engl.).
16. Zou W., He Z., Hotate K. Experimental study of Brillouin scattering in fluorine-doped single-mode optical fibers // Optics Express. 2008. Vol. 16. P. 18804–18812. DOI: 10.1364/OE.16.018804. (In Engl.).
17. Gorchkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. [et al.]. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-Art review and perspective // Sensors 2022. Vol. 22, no. 1033. DOI: 10.3390/s22031033. (In Engl.).
18. Barkov F. L., Konstantinov Y. A., Krivosheev A. I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain

reflectometry // *Fibers*. 2020. Vol. 8, no. 9. P. 1–11. DOI: 10.3390/FIB8090060. (In Engl.).

19. Afshar S., Kalosha V. P., Bao X., Chen L. Enhancement of stimulated Brillouin scattering of higher-order acoustic modes in single-mode optical fiber // *Optics Letters*. 2005. Vol. 30 (20). P. 2685–2687. DOI: 10.1364/OL.30.002685. (In Engl.).

20. Park K., Jeong Y. A quasi-mode interpretation of acoustic radiation modes for analyzing Brillouin gain of acoustically antiguiding optical fibers // *Optics Express*. 2014. Vol. 22, no. 7. P. 2–13. DOI:10.1364/OE.22.007932. (In Engl.).

BOGACHKOV Igor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Communications and Information Security Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 7115-6052

AuthorID (RSCI): 276415

ORCID: 0000-0002-7019-1784

AuthorID (SCOPUS): 3699775670

ResearcherID: A-7770-2015

Correspondence address: bogachkov@mail.ru

For citations

Bogachkov I. V. Analysis of the characteristics of Mandelstam–Brillouin scattering in varieties of erbium optical fibers // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 108–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-108-116.

Received September 07, 2024.

© I. V. Bogachkov

ИЗМЕРЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Эта статья о перспективах развития альтернативной энергетики, роли преобразовательной техники, существующих и разрабатываемых методах оценки потерь индуктивных элементов, работающих в импульсной или резонансной преобразовательной технике и применяемых в энергокомплексах на основе возобновляемых источников энергии. В статье рассматриваются существующие методы оценки потерь в индуктивных элементах и границы их применимости. Рассматриваются новые решения, направленные на улучшение методологии и метрологии измерений. Даются рекомендации по минимизации потерь.

Ключевые слова: измерение потерь, индуктивные элементы, генератор тока, разделение потерь, оптимизация индуктивных элементов, преобразовательная техника, возобновляемые источники энергии, микроГЭС.

Введение. Одним из приоритетов развития энергетики в Российской Федерации является альтернативная энергетика. Её развитие обусловлено не только экологическими аспектами загрязнения окружающей среды углеводородной энергетикой, но и экономической составляющей. Именно экономический аспект развития альтернативной энергетики является в последнее время основным мотивирующим фактором как в странах Западной Европы, так и в других развитых регионах мира, например в Китае. Стоимость решений для альтернативной энергетики в последнее десятилетие значительно снизилась и достигла уровня ископаемых видов топлива [1]. Для Российской Федерации применение альтернативных источников энергии имеет особую важность ввиду удалённости многих небольших населённых пунктов от сетей центрального энергоснабжения. Доступность и качество энергоснабжения таких населённых пунктов можно значительно улучшить именно за счет использования возобновляемых источников энергии.

Важным фактором эффективности альтернативной энергетики является снижение влияния естественных природных циклов и погодных явлений

на доступность энергоснабжения, а также суточные колебания и пики нагрузки потребителей. Эти факторы могут значительно снижать эффективность применения альтернативных источников в особенности в автономных и изолированных системах, так как требуют установку избыточных мощностей для покрытия пиковых нагрузок и учёта погодных факторов. Перспективным решением данной проблемы стало использование гибридных систем с накоплением энергии, которые запасают излишки энергии в часы минимума нагрузок и восполняют её недостаток по необходимости. В настоящее время наиболее популярным видом накопителя энергии является использование литий-ионных аккумуляторов, обладающих высокой плотностью энергии, низким саморазрядом и длительным сроком службы. Этот тип аккумуляторов хорошо подходит как для частного сектора, так и для промышленности [2].

Цель исследования. Альтернативная энергетика использует гидравлическую, солнечную, ветровую и другие виды энергии возобновляемых источников окружающей среды. Сложностью использования этой энергии является большой разброс параметров каждого из источников и, как следствие, слож-

ность согласования этих источников с нагрузкой. Решением данной задачи является использование специального согласующего оборудования, обеспечивающего соответствие нестабильного, меняющегося в широком диапазоне напряжения первичного источника с требованиями потребителя или накопителя энергии. Таким согласующим оборудованием являются различного рода электронные преобразователи частоты и напряжения, выполненные с использованием полупроводниковых приборов, индуктивных и прочих элементов. Характеристики этих преобразователей напрямую отражаются на коэффициенте полезного действия как самого альтернативного источника, так и систем накопления энергии, потому что потери в преобразователе вычитаются из общей доступной энергии. Особенно чувствительными к потерям преобразования являются системы накопления энергии ввиду необходимости двойного преобразования в цикле накопления и отдачи энергии. Как показывает практика, доля потерь в индуктивных элементах или связанных с ними потерь может достигать до 30 % всех потерь преобразования энергии. Ввиду этого, задача оптимизации индуктивных элементов представляется важной для целей расширения возможностей эффективного использования альтернативной энергетики.

Основная часть. Созданная в стенах Национального исследовательского университета «МЭИ» на кафедре гидромеханики и гидравлических машин молодёжная лаборатория автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС (лаборатория микроГЭС) занимается углублённым изучением вопросов создания современных и энергоэффективных источников альтернативной энергетики и систем управления к ним. В 2023 г. на базе лаборатории проведена углублённая модификация стенда микроГЭС выходной мощностью до 700 Вт с целью повышения её эффективности и создана система управления, позволяющая стабилизировать выходные напряжение и частоту при различных уровнях расхода воды через турбинную часть микроГЭС, а также при изменении электрической нагрузки от холостого хода до максимума. Для повышения общей эффективности избыток электрической энергии аккумулируется в виде тепловой энергии, которая может использоваться для целей отопления и горячего водоснабжения. Созданная лабораторная установка выгодно отличается тем, что позволяет исследовать процессы и методы тригенерации, что особенно важно для работы автономных систем тепло- и электроснабжения. На рис. 1 представлена базовая конфигурация автономного комбинированного источника энергии. В базовой конфигурации автономная система имеет возможность обеспечивать потребителей электрической энергией в пределах доступной мощности гидроагрегата и накапливать избытки мощности в виде тепловой энергии в тепловом накопителе.

Устройства стабилизации и преобразования напряжения и тока являются важной составной частью практически всех современных электронных систем. От их характеристик в значительной мере зависит коэффициент полезного действия системы в целом. В основу подавляющего большинства преобразователей заложены индуктивные элементы [3], которые позволяют легко изменять как уровень выходного напряжения, так и плавно регулировать форму тока. Знание и умение применять современные технологии в области разработки индуктивных

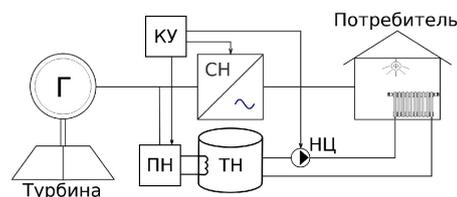


Рис. 1. Турбина — гидротурбина, Г — генератор, СН — стабилизатор напряжения, ПН — преобразователь напряжения, ТН — тепловой накопитель, НЦ — насос циркуляционный, КУ — контроллер управления

элементов является важным аспектом для эффективного решения задач повышения коэффициента полезного действия и миниатюризации преобразователей и создания конкурентоспособной и современной продукции. Разработчик также должен иметь точный измерительный инструмент для сравнения характеристик преобразователей, который позволяет осуществлять итерационный процесс исследования с целью поиска оптимальных инженерных решений.

Индуктивные элементы в электронных схемах выполняют роль накопителей энергии, которая временно сохраняется в магнитном поле, созданном током обмотки. Для усиления магнитного поля используют ферромагнитные сердечники, которые за счет повышенной магнитной проницаемости позволяют значительно увеличить плотность энергии катушки. В процессе работы преобразователей в индуктивных элементах происходит быстрое чередование фаз забора энергии из первичного контура источника и передачи её во вторичный контур приёмника. Таким образом, весь поток энергии проходит через индуктивный элемент и его магнитное поле. Часть передаваемой энергии при этом теряется и переходит в тепло, вызывая нагрев самого индуктивного элемента, что приводит к снижению коэффициента полезного действия преобразователей. Надо заметить, что потери возникают не только в обмотке и в материале сердечника самого индуктивного элемента. Паразитная ёмкость и нелинейность индуктивного элемента вызывает сопутствующие потери и в других элементах преобразователей.

Причиной возникновения потерь является несколько факторов [4]. При прохождении тока в обмотке индуктивного элемента происходит выделение тепла на омическом сопротивлении, вызывая её нагрев. Сопротивление провода возрастает с увеличением температуры. Разница омических потерь в холодном и нагретом состоянии, соответствующем рабочему режиму, может составлять до 40 % и более. Переменная составляющая тока обмотки вытесняется к поверхности проводника, что снижает его эффективное сечение, и сопротивление переменному току значительно повышается. Это явление называется скин-эффектом, который сильно возрастает с увеличением частоты. Взаимное влияние токов в соседних проводниках обмотки (эффект близости) также вызывает увеличение эквивалентного сопротивления обмотки индуктивного элемента за счёт неравномерного перераспределения токов по сечению проводника [5].

В современных преобразователях частота тактирования уже перешагнула порог в 100 кГц. Спектр тока при импульсном регулировании содержит значительную часть высших гармоник, что в совокуп-

ности увеличивает потери от скин-эффекта и эффекта близости.

Возникновение магнитных потерь обусловлено затратами энергии на перемагничивание материала сердечника (гистерезис) и возникновение вихревых токов в нём. Магнитные потери в значительной степени зависят от выбора материала сердечника, частоты перемагничивания и амплитуды переменной составляющей тока. Ввиду того, что часть силовых линий выходит из сердечника, часть потерь локализуется в проводящих материалах конструкции или окружающих проводящих материалах. Особенно заметен этот эффект при наличии зазоров в сердечнике, необходимых для задания определенных свойств магнитного контура. Магнитное поле, выходя из зазора, вызывает нагрев материала обмотки и других проводящих элементов конструкции за счёт вихревых токов.

Наличие паразитной ёмкости присуще всем электронным компонентам. Но именно в индуктивных элементах паразитная ёмкость обмотки может достигать высоких значений. Это обусловлено как большими размерами самих индуктивных элементов, так и большой площадью обмоток. Паразитная ёмкость — это не только собственная ёмкость обмотки индуктивного элемента, но и ёмкость между обмоткой или сердечником и корпусом прибора. Наличие паразитной ёмкости вызывает косвенные потери, так как потерями в материале диэлектрика этой паразитной ёмкости можно пренебречь. При высоком напряжении и частоте преобразования потери энергии на перезаряд этой ёмкости становятся заметными. Ёмкость дросселя вызывает появление высокочастотных паразитных колебаний при каждой коммутации. Энергия паразитных колебаний не участвует в процессе передачи энергии и рассеивается на элементах схемы и выходных фильтрах.

Практический интерес представляет также исследование характеристики изменения индуктивности от величины тока и температуры сердечника. Наиболее часто используемым материалом сердечника является феррит. Ферриты обладают низкими потерями и хорошими частотными характеристиками. При использовании ферритов необходимо учитывать быструю потерю ими магнитной проницаемости при приближении к точке насыщения и сильную зависимость положения точки насыщения от температуры. Два эти фактора приводят к необходимости создания значительных резервов при проектировании индуктивных элементов с использованием ферритов.

Из выше сказанного видно, что задача измерения и оптимизации параметров индуктивного элемента является задачей сложной, с множеством факторов, взаимно влияющих друг на друга. Решение данной задачи важно не только для удовлетворения потребностей разработчиков электронной аппаратуры, но также имеет важное значение для целей производства и контроля качества продукции.

Чтобы решить задачу оптимизации необходимо иметь возможность измерять параметры индуктивных элементов. Достаточно распространёнными для этой цели являются приборы, позволяющие быстро измерить величину потерь на малом сигнале, так называемые LCR-метры [6–7]. Они позволяют измерить величину индуктивности, добротность и тангенс угла потерь в отсутствие тока смещения (подмагничивания сердечника). Но ввиду того, что свойства индуктивного элемента меняются при появлении тока смещения за счет наличия петли

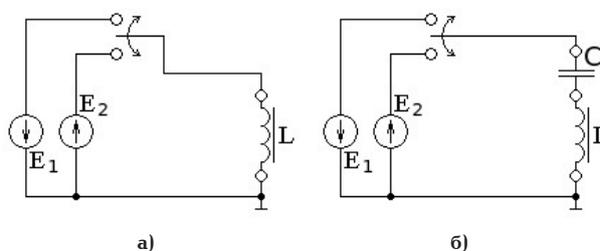


Рис. 2. Принцип действия импульсного а) и резонансного б) генераторов. E_1 и E_2 — независимые источники напряжения, C — резонансный конденсатор, L — испытуемый образец

гистерезиса, LCR-метры не годятся для комплексной оценки потерь. Для решения этой задачи есть профессиональные приборы, позволяющие проводить измерения при различных токах смещения [8]. Но полученные таким образом данные также отличаются от потерь в реальном устройстве, хотя и дают больше информации о характеристике индуктивного элемента. Причина наличия различий заключается в методике измерения при малом сигнале, который не вызывает нагрев обмоток и сердечника индуктивного элемента, соответствующий реальному режиму эксплуатации. Искусственный подогрев индуктивного элемента также не даёт полноты картины, так как в реальности нагрев различных частей сердечника и обмотки не является однородным и разные участки обмотки и сердечника работают в разных температурных режимах.

Из этого следует, что для решения задачи измерения и оптимизации требуется устройство, которое моделировало бы работу индуктивного элемента в готовом изделии, т.е. работало бы с полными рабочими токами и напряжениями. Это позволило бы в реальном времени оценить и измерить потери в индуктивном элементе, исследовать распределение тепла, обнаружить зоны повышенного тепловыделения, проверить эффективность охлаждения, исследовать характеристику насыщения. Проведение таких измерений особенно важно на начальном этапе проектирования, когда нет ещё готового устройства и нет возможности провести проверку предлагаемых образцов индуктивных компонентов на практике. В отсутствие возможности проведения измерений образцов используют приблизительные расчёты, основываясь на справочной информации, а проверка всей системы происходит на финальном этапе разработки [9]. При таком подходе и ввиду временных ограничений по срокам проекта часто не удаётся провести оптимизацию индуктивных элементов.

Работы по созданию тестовых импульсных и резонансных генераторов тока для целей измерения и оптимизации индуктивных элементов велись в МЭИ ещё в начале 2000-х годов и были успешно реализованы совместно с немецкой высшей школой г. Констанц (Германия) [10]. В настоящее время выпускают подобных тестовых генераторов тока занимается немецкая фирма Renergy-Sys. Её генераторы способны работать на токах до 100 А и частотах до 200 кГц при напряжении до 400 В и позволяют решать широкий круг вопросов, связанных с практическими испытаниями индуктивных элементов.

Принцип работы тестовых генераторов представлен на рис. 2. В генераторах имеются независимые источники E_1 и E_2 , которые при помощи силовых ключей попеременно подключаются

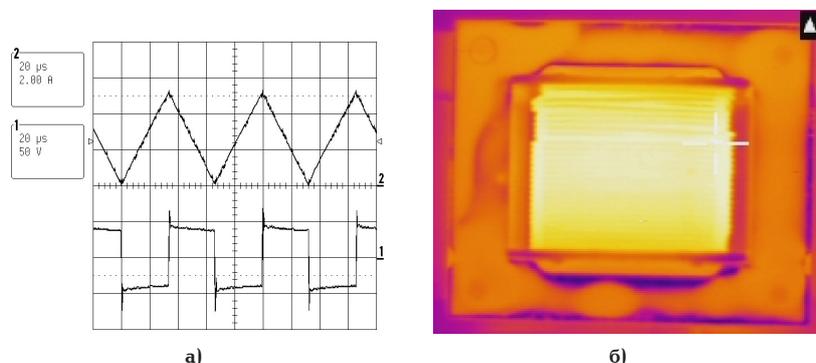


Рис. 3. а) форма тока канал 2 и напряжения канал 1 на исследуемом образце в импульсном режиме, б) термографическое изображение исследуемого образца

к испытываемому индуктивному элементу L , создавая в нём ток заданной формы и частоты. В импульсном генераторе путём изменения напряжений источников E_1 и E_2 варьируется скорость нарастания и спада тока в индуктивном элементе. Регулируя максимум и минимум тока, а также скорость его нарастания можно регулировать частоту тока. В резонансном генераторе резонансная частота задаётся при помощи конденсатора C . Амплитуда тока в индуктивном элементе регулируется напряжением источников E_1 и E_2 . Переключение ключа происходит в момент, когда ток индуктивного элемента близок к нулю.

Временная диаграмма тока индуктивного элемента и напряжения на нём, полученные при испытании на импульсном генераторе, представлены на рис. 3а. На временной диаграмме напряжения отчётливо виден колебательный процесс после каждого переключения, который обусловлен большой паразитной ёмкостью обмотки. Термографическое изображение испытываемого образца, на котором отчётливо видно распределение потерь, представлено на рис. 3б. Основные потери в данном эксперименте возникают в проводниках обмотки и обусловлены их высоким сопротивлением, высокочастотным составляющим тока. Анализ термографического изображения позволяет визуально обнаружить основной источник потерь. Но такой анализ не всегда удобен, так как не даёт полноты картины, не даёт количественной оценки и требует наличия дорогостоящего оборудования.

Наиболее перспективным методом анализа индуктивных элементов представляется измерение мощности потерь электрическими методами. В первых экспериментах для измерения мощности потерь применялся классический метод ваттметра. Как известно, мощность потерь при несинусоидальной форме тока и напряжения можно определить, перемножив мгновенные значения напряжения на индуктивном элементе и тока через него с последующим интегрированием результата [11]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt.$$

Низкая точность такого метода состоит в большом (около двух порядков) соотношении передаваемой через индуктивный элемент реактивной мощности и величиной потерь в нём. При использовании метода ваттметра для получения погрешности измерения мощности потерь не более 10 % точность измерения полной мощности должна быть не менее 0,1 %. При этом недостаточно иметь соответствующие разрешения по точности для измерения тока

и напряжения. Крайне важно обеспечить минимальный сдвиг по времени и фазе сигналов в цепях измерения тока и напряжения в широком частотном диапазоне (до 1 МГц и выше), что является сложной задачей ввиду отличий в реализации каналов измерения различных величин и на разных диапазонах измерения. Даже с использованием дорогостоящих измерительных приборов и при точном соблюдении методики измерений не удаётся достичь желаемой точности, так как временные сдвиги различных измерительных каналов не остаются постоянными во времени и сильно зависят от температуры. Если всё же удаётся получить устойчивое измерение, возникает вопрос калибровки измерительного оборудования, так как установившиеся значения набега фаз неизвестны, а образцовые индуктивные компоненты с заданными параметрами потерь не выпускаются. Методом ваттметра удаётся произвести измерения с удовлетворительной точностью только для индуктивных элементов, имеющих заметные потери на частотах до 1 кГц, что очень далеко от потребностей современной преобразовательной техники.

Неудачные попытки проведения прямых измерений привели к разработке методик косвенной оценки потерь. Одним из вариантов решения стало измерение общей потребляемой мощности генератора тока совместно с индуктивным элементом. Ввиду того, что питание генератора тока осуществляется на постоянном токе, само измерение не представляет особой сложности. Недостатком метода, конечно, является включение в результат потерь на силовых ключах. Если генератор тока выполнить на полевых транзисторах, в режиме малых токов можно пренебречь потерями самого генератора ввиду низкого сопротивления канала и низкими динамическими потерями. С возрастанием тока потери в ключах растут в квадратичной зависимости, а полевые транзисторы имеют сильную зависимость сопротивления канала от температуры. Поэтому такой подход измерения потерь значительно сужает диапазон использования генератора и не решает всей задачи в целом. Большинство индуктивных компонентов, использующихся в преобразовательной технике, рассчитаны на значительные токи в десятки и более Ампер и не поддаются такому упрощённому варианту измерения без возникновения значительной методической погрешности. Но метод измерения общего потребления показал себя хорошо при сравнительном анализе двух образцов, работающих в заданной рабочей точке.

В генераторах от фирмы Renenergy-Sys (Германия) реализована попытка оценки потерь в силовых ключах, исходя из режима их работы. Программное

Источники потерь и методы их оптимизации

Потери по месту их возникновения		
в обмотке	в сердечнике	конструктивные
на омическом сопротивлении	гистерезисные и вихретоковые потери	— вызванные ёмкостью обмотки — вихретоковые, вызванные полем зазора
Методы оптимизации		
— применение плоских или многожильных проводников — увеличение сечения проводника — увеличение расстояния между слоями — заливка компаундом	— выбор материала и формы сердечника — увеличение сечения сердечника	— однослойная намотка — чередование слоёв — снижение ёмкости относительно корпуса — сегментирование сердечника — геометрическое удаление обмотки и зазора

обеспечение рассчитывает динамические и статические потери, основываясь на технических данных производителя и учитывая температурный режим работы. Точность такой оценки достаточно низка и не годится для задачи разделения потерь на составляющие. Обусловлено это вариациями параметров силовых ключей от заявленных производителем, их сильная температурная зависимость и ограниченность данных от производителя.

В настоящее время идёт поиск решения, которое позволило бы обеспечить приемлемую точность измерения во всём диапазоне токов, частот и напряжений. Наиболее перспективным методом исследования данной задачи представляется построение математических моделей генератора и индуктивного элемента и их совместное исследование. Данный подход позволяет минимизировать затраты времени на подготовку и постановку измерительных экспериментов и сконцентрироваться на методологии самого измерения. Разработанные математические модели уже позволили подтвердить полученные ранее результаты практических измерений и тем самым доказали перспективность данного подхода. В настоящий момент поиск решения ведётся в двух направлениях: изменение схемотехники самого генератора тока для минимизации его влияния на исследуемый индуктивный элемент и изменение схемотехники измерительных каналов для минимизации измерительной погрешности.

Успешное решение задачи точного и быстрого измерения потерь в индуктивном элементе позволит эффективно подойти к задаче его оптимизации. Для эффективной оптимизации необходимо знать преобладающую составляющую потерь, которая может быть вычислена по результатам измерений методом варьирования параметров, так как разные составляющие потерь имеют разные зависимости от частоты и амплитуды тока [12–13]:

$$P = P_R + P_{\text{скин}} + P_{\text{близ}} + P_{\Gamma} + P_{\text{вт}} + P_{\text{с'}}$$

где P — общие потери индуктивного элемента;

P_R — потери, вызванные сопротивлением обмотки по постоянному току;

$P_{\text{скин}}$ — потери, вызванные дополнительно вносимым сопротивлением от скин-эффекта;

$P_{\text{близ}}$ — потери, вызванные дополнительно вносимым сопротивлением от эффекта близости;

P_{Γ} — потери гистерезисные в материале сердечника;

$P_{\text{вт}}$ — вихретоковые потери;

$P_{\text{с'}}$ — потери, связанные с перезарядом ёмкости обмотки.

Для разделения потерь на составляющие необходимо провести несколько измерений с варьированием параметров. По результатам этих измерений составляется система нелинейных уравнений, решением которой и являются отдельные составляющие потерь. Время проведения измерений должно быть минимизировано, так как протекание тока через индуктивный элемент приводит к его нагреву, что значительно изменяет его характеристики. Сопротивление обмотки быстро возрастает (для меди тепловой коэффициент составляет $+0,4 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ [14]), а гистерезисные потери сердечника снижаются при нагреве. При значительном изменении характеристик в ходе проведения измерений достоверное разделение потерь на составляющие становится невозможным, так как полученная система уравнений не будет иметь решения.

В табл. 1 перечислены основные источники потерь и возможные методы их оптимизации. Данная таблица отражает накопленный опыт и может служить ориентиром при поиске оптимального решения.

Закключение. Оптимизация потерь в индуктивных элементах является поиском компромиссного решения по выбору оптимума из многих составляющих [12]. Это многоуровневая задача, требующая глубокого понимания взаимосвязей тех или иных изменений. Разрабатываемый метод измерения потерь нацелен на упрощение процесса оптимизации и должен упростить, но не заменить этот процесс. Основными целями оптимизации обычно являются снижение потерь и уменьшение размеров индуктивных компонентов. В некоторых случаях удаётся добиться улучшения обоих этих показателей. Примером компромиссной оптимизации может быть, например, замена массивного проводника на многожильный изолированный провод с целью снижения потерь по высокочастотной составляющей тока. При такой замене либо увеличивается сопротивление обмотки постоянному току из-за более низкой плотности заполнения многожильным проводом площади сечения катушки, либо приходится увеличивать площадь сечения катушки для сохранения сопротивления постоянному току.

Другим примером может быть желание снизить температуру катушки путём заливки компаундом. Компаунд, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, позволит распределить тепло по всему объёму и увеличить площадь охлаждения. Но вместе с этим увеличится межвитковая ёмкость и ёмкость относительно корпуса прибора, что приведёт к увеличению колебательных процессов и увеличению потерь.

Материалы, вошедшие в данную статью, подготовлены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Национального проекта «Наука и университеты» о создании новых лабораторий, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей — Уникальный номер проекта FSWF-2022-0008. Соглашение № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

Библиографический список

1. Стоимость производства электроэнергии из возобновляемых источников в 2020 году // IRENA. 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_RU.pdf?rev=eecd651ee0914017ba3594d85b6dca1b (дата обращения: 27.02.2024).
2. Россихин Д. А., Менделеев Д. И., Галимзянов Л. А. Вопросы применения и развития систем накопления электроэнергии // Развивая энергетическую повестку будущего: сб. тр. конф. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 24-29. EDN: UYMWGF.
3. Коростелин А. В. Импульсные источники питания. Элементная база, архитектура и ремонт. Москва: СОЛОН-Пресс, 2020. С. 118–216. ISBN 978-5-91359-412-9.
4. Кочемасов В., Хорев С. Современные индуктивные радиокомпоненты. Часть 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 2 (213). С. 142–152. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.142.152. EDN: BPJTVI.
5. Yurkov A. S. To the theoretical description of the losses in inductance coils // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 4 (39). С. 19–29. EDN: YWYYGL.
6. LCR-Измеритель R&SLCX. Спецификация. Версия 2.02 // Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Июль 2023. С. 1–24. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/data_sheet/3609_8309_38/LCX_dat_ru_3609-8309-38_v0202.pdf (дата обращения: 04.03.2024).
7. LCR Measurement Primer. Precision instruments for test and measurement // IET Labs Inc. 2018. № 1. P. 2–78. URL: https://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf (дата обращения: 14.02.2024).
8. DC Bias Current Sources. 3265B Technical Data Sheet // Wayne Kerr Electronics. P. 1–2. URL: <http://www.waynekertest.com/datasheet/instruments/wk3265b.pdf> (дата обращения: 14.02.2024).
9. Уилсон Л. Внутрисхемное измерение параметров дросселей и трансформаторов в импульсных источниках питания // ООО «Альфа Инструментс». URL: https://alfa-inst.ru/blog/stati/vnutriskhemnoe_izmerenie_parametrov_drosseley_i_tr/ (дата обращения: 14.02.2024).
10. Voigt G., Dobrenko A., Kirjuchin A., Komarov E. Optimierte Drosselspulen für die moderne Leistungselektronik // FHK Forum. 2004–2005. P. 56–59.
11. Касаткин А. С., Немцов М. В. Курс электротехники. 8-е изд., стер. Москва: Высшая школа, 2005. 542 с. ISBN 5-06-005276-1.
12. Albach M. Induktive Komponenten in der Leistungselektronik // Bauelemente der Leistungselektronik. VDE Verlag GmbH. Aprl. 13–14, 2011. Berlin. S. 77–86.
13. Ferrite Summary // TDK. 2021. P. 3–8. URL: https://product.tdk.com/en/system/files?file=dam/doc/product/ferrite/ferrite/ferrite-core/catalog/ferrite_summary_en.pdf (дата обращения: 14.02.2024).
14. Алиев И. И. Электротехнический справочник. 5-е изд., стер. Москва: РадиоСофт, 2010. 383 с. ISBN 978-5-93037-213-7.

ВОЛКОВ Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 3022-2171

AuthorID (РИНЦ): 726099

ORCID: 0000-0002-0011-1056

AuthorID (SCOPUS): 56900509700

ResearcherID: A-6919-2014

Адрес для переписки: VolkovAV@mpei.ru

ДОБРЕНКО Алексей Михайлович, инженер-исследователь лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

Адрес для переписки: DobrenkoAM@mpei.ru

ДРОБНИЦКИЙ Никита Андреевич, магистр, младший научный сотрудник лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 5290-2197

AuthorID (РИНЦ): 1176333

ORCID: 0009-0006-4484-9745

Адрес для переписки: DrobniiskyNA@mpei.ru

ДРУЖИНИН Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 8488-6471

AuthorID (РИНЦ): 843020

ORCID: 0000-0001-9198-9253

AuthorID (SCOPUS): 57192078235

Адрес для переписки: DruzhininAA@mpei.ru

МЫЛКИН Дмитрий Васильевич, аспирант, ассистент кафедры гидромеханики и гидравлических машин им. В. С. Квятковского, младший научный сотрудник лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 8304-9535

AuthorID (РИНЦ): 1176114

Адрес для переписки: MylkinDV@mpei.ru

ШЕЙКИН Максим Олегович, младший научный сотрудник лаборатории автономных источников энергии и обратимых гидроагрегатов на основе микроГЭС Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 6282-3730

AuthorID (РИНЦ): 1179616

ORCID: 0000-0002-6859-586X

Адрес для переписки: SheykinMO@mpei.ru

Для цитирования

Волков А. В., Добренко А. М., Дробницкий Н. А., Дружинин А. А., Мылкин Д. В., Шейкин М. О. Измерение и оптимизация индуктивных элементов в системах управления комбинированными энергокомплексами на основе возобновляемых источников энергии // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-117-124.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024 г.

© А. В. Волков, А. М. Добренко, Н. А. Дробницкий, А. А. Дружинин, Д. В. Мылкин, М. О. Шейкин

MEASUREMENT AND OPTIMIZATION OF INDUCTIVE ELEMENTS IN CONTROL SYSTEMS OF COMBINED HEAT AND POWER SUPPLY BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

The article deals with the role of inverter technology in the future development of renewable energies, existing methods for measuring the loss power of inductive elements and their further development, which are used in pulse or resonance inverters for heating and energy supply based on renewable energies. The research presents an overview of the existing methods and their applicability for measuring the power loss of inductive elements. A new approach is proposed for the preliminary estimation of the power loss of inductive elements based on measurements that approximate real operating conditions. The actual state of the technology in this field is described and the functional concept of test current generators is presented. The difficulties in separating the power loss into individual components are considered and the characteristics of the measurement method for solving this problem are addressed. In addition, the physical causes of the individual components of power losses in inductive elements are discussed and recommendations for minimizing are demonstrated.

Keywords: power loss measurement, inductive elements, test current generator, power loss separation, inductive element optimisation, inverter technology, renewable energy sources, micro hydroelectric power plants.

Acknowledgments

The work is carried out by the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the National Project «Science and Universities» on the creation of new laboratories under the leadership of young promising researchers. Legal project number FSWF-2022-0008. Agreement No. 075-03-2022-138/5 from 02.11.2022.

References

1. Stoimost' proizvodstva elektroenergii iz vobnovlyayemykh istochnikov v 2020 godu [Renewable power generation costs in 2020] // IRENA. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_RU.pdf?rev=eecd651ee0914017ba3594d85b6dca1b (accessed: 27.02.2024). (In Russ.).
2. Rossikhin D. A., Mendeleyev D. I., Galimzyanov L. A. Voprosy primeneniya i razvitiya sistem nakopleniya elektroenergii

[Issues of application and development of energy storage systems] // Razvivaya energeticheskuyu povestku budushchego. *Developing the Energy Agenda of the Future*. Saint Petersburg, 2021. P. 24–29. EDN: UYMWGF. (In Russ.).

3. Korostelin A. V. Impul'snyye istochniki pitaniya. Elementnaya baza, arkhitektura i remont [Pulse power supplies. Element base, architecture and repair]. Moscow, 2020. P. 118–216. ISBN 978-5-91359-412-9. (In Russ.).

4. Kochemasov V., Khorev S. Sovremennyye induktivnyye radiokomponenty. Chast' 1 [Modern inductive radio components. Part 1] // Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2022. No. 2 (213). P. 142–152. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.142.152. EDN: BPJTVI. (In Russ.).

5. Yurkov A. S. To the theoretical description of the losses in inductance coils // Tekhnika radiosvyazi. *Radio Communication Technology*. 2018. Issue 4 (39). P. 19–29. EDN: YWYIYL. (In Engl.).

6. LCR-Izmeritel' R&S LCX. Spetsifikatsiya. Versiya 2.02 [R&S LCX LCR Meter. Specification. Version 2.02] // Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. July 2023. P. 1–24. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_

datasheets/data_sheet/3609_8309_38/LCX_dat_ru_3609-8309-38_v0202.pdf (accessed: 04.03.2024). (In Russ.).

7. LCR Measurement Primer. Precision instruments for test and measurement // IET Labs Inc. 2018. No. 1. P. 2–78. URL: https://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/030122%20IET%20LCR%20PRIMER%201st%20Edition.pdf (accessed: 14.02.2024). (In Engl.).

8. DC Bias Current Sources. 3265B Technical Data Sheet // Wayne Kerr Electronics. P. 1–2. URL: <http://www.waynekerrtest.com/datasheet/instruments/wk3265b.pdf> (accessed: 14.02.2024). (In Engl.).

9. Wilson L. Vnutriskhemnoe izmerenie parametrov drossley i transformatorov v impul'snykh istochnikakh pitaniya [In-circuit measurement of inductors and transformers in switching power supplies] // ООО «Alfa Instruments». LTD «Alfa Instruments». URL: https://alfa-instr.ru/blog/stati/vnutriskhemnoe_izmerenie_parametrov_drossley_i_tr/ (accessed: 14.02.2024). (In Russ.).

10. Voigt G., Dobrenko A., Kirjuchin A., Komarov E. Optimierte Drosselspulen für die moderne Leistungselektronik // FHK Forum. 2004–2005. P. 56–59 (In Germ.).

11. Kasatkin A. S., Nemtsov M. V. Kurs elektrotehniki [Book of electrical engineering]. 8th ed., ster. Moscow, 2005. 542 p. ISBN 5-06-005276-1. (In Russ.).

12. Albach M. Induktive Komponenten in der Leistungselektronik [Inductive components in power electronics] // Bauelemente der Leistungselektronik. *Components in Power Electronics*. VDE Verlag GmbH. Aprl. 13–14, 2011. Berlin. P. 77–86. (In Germ.).

13. Ferrite Summary // TDK. 2021. P. 3–8. URL: https://product.tdk.com/en/system/files?file=dam/doc/product/ferrite/ferrite/ferrite-core/catalog/ferrite_summary_en.pdf (accessed: 14.02.2024). (In Engl.).

14. Aliyev I. I. Elektrotehnicheskiy spravochnik [Electrical Engineering Handbook]. 5th ed., ster. Moscow, 2010. 383 p. ISBN 978-5-93037-213-7. (In Russ.).

VOLKOV Aleksandr Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Hydromechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 3022-2171

AuthorID (RSCI): 726099

ORCID: 0000-0002-0011-1056

AuthorID (SCOPUS): 56900509700

ResearcherID: A-6919-2014

Correspondence address: VolkovAV@mpei.ru

DOBRENKO Aleksey Mikhaylovich, Research Engineer of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

Correspondence address: DobrenkoAM@mpei.ru

DROBNITSKIY Nikita Andreyevich, Master's Degree, Junior Researcher of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 5290-2197

AuthorID (RSCI): 1176333

ORCID: 0009-0006-4484-9745

Correspondence address: DrobnitskyNA@mpei.ru

DRUZHININ Aleksey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Head of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 8488-6471

AuthorID (RSCI): 843020

ORCID: 0000-0001-9198-9253

AuthorID (SCOPUS): 57192078235

Correspondence address: DruzhininAA@mpei.ru

MYLKIN Dmitriy Vasilyevich, Graduate Student, Assistant of Hydromechanics and Hydraulic Machines named after V. S. Kvyatkovsky Department, Junior Researcher of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 8304-9535

AuthorID (RSCI): 1176114

Correspondence address: MylkinDV@mpei.ru

SHEYKIN Maksim Olegovich, Junior Researcher of Autonomous Energy Sources and Reversible Hydropower Units Based on Microhydropower Plants Laboratory, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow.

SPIN-code: 6282-3730

AuthorID (RSCI): 1179616

ORCID: 0000-0002-6859-586X

Correspondence address: SheykinMO@mpei.ru

For citations

Volkov A. V., Dobrenko A. M., Drobnitskiy N. A., Druzhinin A. A., Mylkin D. V., Sheykin M. O. Measurement and optimization of inductive elements in control systems of combined heat and power supply based on renewable energy sources // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 4 (192). P. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-117-124.

Received March 27, 2024.

© A. V. Volkov, A. M. Dobrenko, N. A. Drobnitskiy,

A. A. Druzhinin, D. V. Mylkin, M. O. Sheykin

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ

Системы диагностики, внедренные на многих промышленных объектах, предназначены для своевременного обнаружения дефектов и тем самым предотвращения внезапных отказов с последующим простоем оборудования, сопровождающимся экономическими убытками. В основе работы большинства систем диагностики лежит принятие решения об исправности или неисправности объекта на основании сравнения диагностических параметров с пороговыми значениями. Проблемой такого подхода является то, что выход за установленные пределы фиксируется уже после того, как оборудование потеряло ремонтпригодность или требует сложного дорогостоящего ремонта. В связи с этим ставится цель раннего и достоверного обнаружения дефектов электромеханического оборудования. Цель достигается путем разработки алгоритма обнаружения начала отклонения во временном ряде, состоящем из последовательно зарегистрированных диагностических параметров. Алгоритм базируется на последовательном применении анализа сингулярного спектра и позволяет не только своевременно выявлять отклонения, но и оценивать вероятность ошибки принятия решения. Алгоритм обработки данных исследован на наборах данных, сгенерированных в соответствии с заданными законами изменения. Также на реальном наборе диагностических данных продемонстрирована возможность своевременного и достоверного обнаружения дефектов. Внедрение алгоритма при управлении состоянием оборудования будет способствовать повышению безопасности и экономичности производственных объектов.

Ключевые слова: система диагностики, вибрационный контроль, обнаружение точек изменения, управление состоянием, ошибки принятия решения, сингулярный спектральный анализ.

1. Введение. Системы диагностики внедрены на многих промышленных производствах [1–3]. Стационарные и переносные системы, выполняющие регистрацию, хранение и обработку данных, отличаются видом измеряемой информации и подходами к ее обработке. В большинстве систем регистрируется сигнал вибрации, который подвергается частотной или статистической обработке. Применение частотных методов [4] требует регистрации сигнала с высокой частотой, что легко выполняется в переносных системах, но с трудом реализуется в стационарных, учитывая продолжительность регистрации и ограниченный объем памяти системы. В большинстве стационарных систем предусмотрено вычисление и сохранение среднеквадратического значения (СКЗ). В этом случае решение о неисправности объекта принимается на основании превышения в течение заданного периода СКЗ вибрации порогового значения, т.е. реализуется функциональная схема на рис. 1 [5]. Пороговые значения обычно выбираются исходя из нормативных документов [6, 7]. Однако известны случаи [1], когда

выход за установленные пределы фиксируется уже после того, как оборудование потеряло ремонтпригодность или требует сложного ремонта.

Таким образом, решение проблемы снижения частоты отказов, простоев оборудования и связанных с этими явлениями экономических последствий [8, 9] требует обнаружения дефектов электромеханического оборудования ранее достижения данным оборудованием предельного либо опасного состояния с высокой вероятностью отказа. Для разработки эффективных систем диагностики электромеханического оборудования представляется перспективным использование вероятностно-статистических методов принятия решения [10–12].

Несмотря на огромный опыт эксплуатации систем мониторинга технического состояния оборудования [1–4, 8–12], разработчики сталкиваются с такими проблемами, как:

- сложность аналитического описания процессов деградации;
- отсутствие информации о проявлении дефектов в диагностических параметрах;



Рис. 1. Функциональная схема управления состоянием объекта

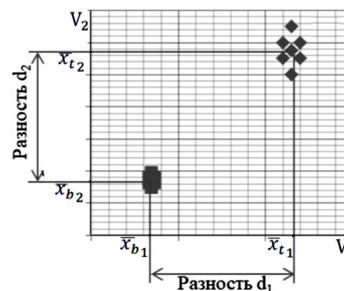


Рис. 2. Координаты векторов, соответствующих исправному и тестируемому состоянию в эталонном базисе

— недостаточность информации для обоснования норм диагностических параметров.

Решение данных проблем требуют материальных и временных ресурсов. Существующие системы диагностики сложного механического оборудования нуждаются в постоянной перенастройке, при этом остаются малоэффективными для раннего обнаружения дефектов. При разработке систем диагностики внедрение методов, которые требуют для своей реализации только минимальных априорных сведений о параметрах нормальной эксплуатации оборудования, представляется перспективным направлением. Методы выявления отклонений на основе анализа структуры временных рядов [13–15] в сфере технической диагностики представляют относительно новизну.

2. Метод раннего обнаружения изменений во временных рядах

2.1. Идея метода. Существуют различные подходы к определению момента, начиная с которого временной ряд приобретает другие характеристики. Наиболее широкое распространение получил метод кумулятивных сумм [13]. Последний хорошо себя зарекомендовал для анализа временных рядов простой структуры. Временные ряды диагностических параметров часто имеют сложную структуру, изменение которой свидетельствует об ухудшении состояния [14]. Поэтому используется метод сингулярного спектрального анализа (ССА), позволяющий разложить исходный временной ряд на трендовые, периодические и шумовые составляющие. Основная идея обнаружения заключается в разложении выборок временного ряда с получением сингулярного базиса, соответствующего заведомо исправному состоянию. Данный базис является эталонным, на него впоследствии проектируются данные исправного и тестируемого состояний. В основу обнаружения ложится гипотеза о том, что проекции выборок исправного состояния в эталонном базисе лежат близко друг к другу, а различия проекций случайны, распределены около нуля по закону, близкому к нормальному. Отклонение состояния проявляется в том, что проекции выборок в эталонном базисе удаляются от проекций исправного состояния настолько, что их разности выходят за пределы нормативного интервала (рис. 2). Для упрощения сравниваются не все проекции, а их средние значения.

2.2. Метод последовательного применения ССА. Получение базовой матрицы. Основная идея ССА заключается в выполнении сингулярного разложения траекторной матрицы, полученной из исходного временного ряда. Пусть x_1, x_2, \dots, x_N — временной ряд, соответствующий исправному состоянию. Нужно выбрать m ($m \leq N/2$) — некоторое

целое число, называемое «задержкой», и пусть $n = N - m + 1$. Тогда возможно определение траекторной матрицы:

$$X_b = (x_{ij})_{i,j=1}^{m,n} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_N \end{pmatrix}. \quad (1)$$

С точки зрения теории матриц, X_b — ганкелева матрица. Поскольку с её помощью получают базовые характеристики, назовем её базовой.

Согласно алгоритму метода ССА, матрица X_b преобразуется в матрицу ковариации C .

Следующий шаг — разложение по сингулярным значениям. Матрица $[C]$ может быть разложена на произведение трех матриц: $[U]$ ортогональная матрица, $[S]$ диагональная матрица и $[V]^T$ транспонирование ортогональной матрицы $[U]$. Иначе говоря, ковариационная матрица может быть представлена в виде:

$$[C]_{m \times m} = [U]_{m \times m} [S]_{m \times m} [V]^T_{m \times m} \quad (2)$$

где $U^T U = 1$ и $V^T V = 1$; S — диагональная матрица, содержащая квадратные корни из собственных значений $C^T C$. Пусть V_i — собственные векторы матрицы $C^T C$ (главные компоненты, формирующие эталонный базис).

Очередным шагом должно стать разделение компонент на статистически значимые «сильные» и другие «слабые» [15]. Однако в настоящей интерпретации метода предлагается для исключения потери в точности не выполнять разделение и использовать все компоненты разложения. При необходимости по проекциям на главные компоненты может быть восстановлена и матрица, характеризующая составляющие, вносящие статистически наибольший вклад в формирование исходного ряда. Однако в настоящей интерпретации мы ограничиваемся получением проекций ганкелевой матрицы на базис

$$[\hat{X}] = [X_b][V]. \quad (3)$$

Матрица $[\hat{X}]$ состоит из векторов $[\hat{X}] = \{x_{bi1}, x_{bi2}, \dots, x_{bim}\}$. Для координат каждого вектора вычисляется среднеарифметическое значение:

$$\bar{x}_{bi} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{bij}. \quad (4)$$

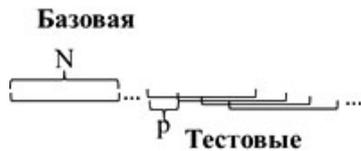


Рис. 3. Разделение временного ряда на выборки

Значения, вычисленные по формуле 4, сравниваются с аналогично полученными значениями последующих реализаций временного ряда для обнаружения изменения.

Получение тестовой матрицы. Чтобы сделать алгоритм обнаружения изменения последовательным, мы будем применять ССА к траекторным матрицам, вычисленным на интервале $[k \cdot p + 1, k \cdot p + N]$ длины N :

$$X_t = \begin{pmatrix} X_{k \cdot p + 1} & X_{k \cdot p + 2} \cdots & X_{k \cdot p + n} \\ X_{k \cdot p + 2} & X_{k \cdot p + 3} \cdots & X_{k \cdot p + n + 1} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ X_{k \cdot p + m} & X_{k \cdot p + m + 1} \cdots & X_{k \cdot p + N} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

здесь k — номер итерации, p — сдвиг скользящего окна.

Схема разделения ряда на выборки представлена на рис. 3. Тестовая матрица конструируется таким образом, чтобы она могла содержать значения до и после отклонений.

Рекомендуется выбирать $p \leq m$. Слишком малое p приведет к очень плавной реакции на изменение механизма генерации временного ряда, а слишком большое — к запаздыванию реакции на изменение.

Предварительный анализ параметров исправного состояния проводится с целью изучения поведения параметров исправного состояния в базовом пространстве, которое может отличаться для различного вида оборудования, режимов работы, регистрирующих приборов и других факторов. Параметры заведомо исправного состояния, начиная с $k \cdot p > N$, преобразуют в тестовые матрицы вида (5) и проецируют на эталонный базис. Для координат каждого вектора вычисляется среднеарифметическое значение:

$$\bar{x}_{ti} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{tij}. \quad (6)$$

Если состояние оборудование (а следовательно, и механизм генерации) не меняется, то пары значений $(\bar{x}_{ti}; \bar{x}_{bi})$ близки друг к другу, а разности разделены около 0:

$$d_i = \bar{x}_{ti} - \bar{x}_{bi}. \quad (7)$$

В результате анализа K тестовых выборок, получается $K \cdot m$ разностей, объединив которые можно получить среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{K \cdot m} (d_i - \bar{d})^2}{K \cdot m}}. \quad (8)$$

Если принять гипотезу о нормальном распределении d_i , то практически все значения (99,73 %) из этой группы входят в интервал $\pm 3\sigma$. В рамках на-

стоящей работы используется граничное значение $h = \sigma$.

Обнаружение точек изменения. Предлагаемый алгоритм обнаружения точки перехода основан на наблюдении, что если в определенный момент времени T механизм генерации изменится, то следует ожидать увеличения расстояния в m -мерном пространстве между значениями $\{\bar{x}_{bi}\}$ и $\{\bar{x}_{ti}\}$.

Гипотезу, что отклонения механизма генерации временного ряда не произошло, обозначим H_0 , а противоположную H_1 . С момента возникновения отклонения можно оценить вероятность ошибки типа II (вероятность пропуска отклонения):

$$\alpha_{11} = P\{\text{принять } H_0 | H_1\} = \frac{q}{N}, \quad (9)$$

где q — число значений из массива $\{d_i\}$, полученных в результате обработки тестовой выборки на интервале $[k \cdot p + 1, k \cdot p + N]$, оказавшихся меньше порога h . В случае снижения вероятности пропуска отклонения ниже допустимого значения $P_{\text{доп}}$ можно зафиксировать момент обнаружения:

$$T = (k \cdot p + N) f_{\text{дискр}}, \quad (10)$$

где $f_{\text{дискр}}$ — частота дискретизации. В момент T должно автоматически формироваться оповещение оператора об отклонении в работе объекта, после чего он обязан принять меры по сохранению его работоспособности.

Таким образом, метод ССА применительно к временному ряду выделяет столько трендов, сколько отсчетов попадает в окно ганкелизации. Чтобы избежать субъективного выбора трендов предлагается наблюдение за всеми ними и сигнализация несоответствия трендов в базовой и тестовой выборках.

3. Алгоритм обработки данных

3.1. Предварительный анализ. Алгоритм предполагает предварительный анализ выборок диагностического параметра с целью установления доверительного интервала $\pm h$. Рекомендуется на заведомо исправном оборудовании установить, в каких пределах могут изменяться расстояния $\{d_i\}$. Для этого целесообразно регистрировать базовую выборку объемом N (1000–2000) и данные для тестовых выборок объемом не менее $2N$. Из второй группы данных получить тестовые выборки длиной N со сдвигом $p \leq N$ (20–500). Описанная схема рекомендуется для обработки результатов регистрации СКЗ диагностических сигналов оборудования, работающего с неизменной частотой вращения и постоянной нагрузкой [1].

Базовую и первую тестовую выборки требуется преобразовать в ганкелевы траекторные матрицы размерностью $m \times n$ (рекомендуется $m = n = N/2$). Первую матрицу преобразовать в матрицу ковариации. Матрицу ковариации подвергнуть сингулярному разложению и получить эталонный базис. Получить проекции первой и второй матрицы на эталонный базис. Вычислить средние значения (центры) проекций координат вдоль каждого направления. Получить разности между центрами двух наборов данных $\{d_i\}$, $i \in (n + 1) \dots 2n$. С использованием следующей тестовой выборки дополнить $\{d_i\}$ расстояниями $i \in (n + 1) \dots 2n$. Аналогично получить расстояния от проекций первой выборки до проекций последующих выборок. Таким образом, получив закон распределения разностей, воз-



Рис. 4. Алгоритм обработки данных и поддержки принятия решений

можно получить среднеквадратичное отклонение расстояний проекций и доверительный интервал, либо каким-то иным способом обосновать порог $\pm h$. Результатом анализа параметров заведомо исправного оборудования также являются эталонный базис и координаты центров проекций базовой выборки в нем. Эти данные нужны для реализации алгоритма обработки данных. Для оборудования, работающего в различных режимах, требуется анализ выборок во всех режимах.

3.2. Алгоритм обработки информации для принятия решения. При эксплуатации объекта реализуется алгоритм, представленный на рис. 4. Регистрируют объем данных $N + p$. В результате преобразований получается массив разностей меж-

ду базовыми и тестовыми данными $\{d_i\}$. Предполагается, что если оборудование исправно, то $\{d_i\}$ должны укладываться в интервал $\pm h$. Если из n значений некоторое количество \tilde{n} в интервал не укладывается, то можно оценить вероятность $P = \frac{\tilde{n}}{n}$,

которая сопоставляется с заранее выбранным допустимым значением $P_{\text{доп}}$. В зависимости от соответствия допустимому значению оператор получает сообщение об отсутствии или наличии отклонения. Далее данные анализируются по мере заполнения буфера.

Следует отметить, что описанный алгоритм — один из вариантов последовательности действий для предоставления оператору данных, важных для управления состоянием объекта. Например, можно в зависимости от значения P предложить несколько уровней оповещения.

4. Численный эксперимент. Для демонстрации возможности принятия своевременного и обоснованного решения на основании анализа временных рядов проводилось пять серий численных экспериментов [15]. Для этого генерировались и объединялись во временной ряд две выборки, распределенные по нормальному закону с одинаковой дисперсией, при этом математические ожидания вторых выборок последовательно в различных сериях отличаются от математического ожидания первой на 2, 5, 8, 15 и 20 % (ступенчатое возмущение). Пример анализируемого временного ряда представлен на рис. 5. Выдвигается гипотеза, что если механизм генерации временного ряда меняется, то увеличиваются расстояния между проекциями выборок в эталонном базисе. Целью эксперимента была оценка времени от начала изменения данных до его обнаружения.

Первоначально анализу, описанному в параграфе 2.1, подвергались выборки из первой части данных, сформированные в соответствии со схемой на рис. 3 ($N = 1000$, $p = 100$, $m = n = 500$). Результатом является распределение разностей (рис. 6), которое показывает, что когда нет изменений в процессе, $\{d_i\}$ распределены около 0; большая часть выборки лежит внутри нормативного интервала $\pm 0,19$.

Данные, начиная с двухтысячного отсчета, подвергались обработке согласно алгоритму, представленному на рис. 4.

Результаты представлены на рис. 7. До начала изменения данных проекции отличались мало, и $\{d_i\}$ с вероятностью более 90 % соответствовали первым реализациям. Включение в тестовую выборку первых $p = 100$ отсчетов, начиная от момента сбоя, привело к явной реакции проекций (кроме первой серии с разницей матожиданий 2 %), их

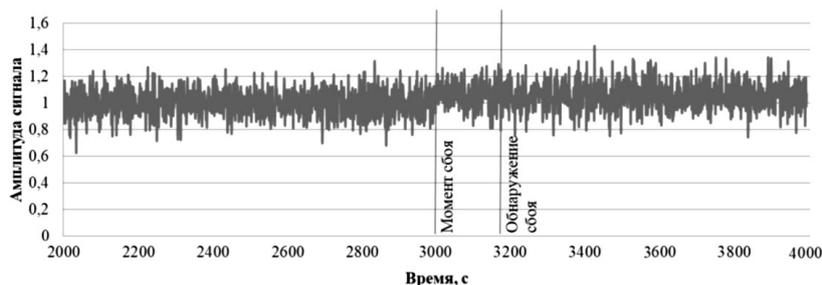


Рис. 5. Пример данных: среднее значение после сбоя повышается на 5 %

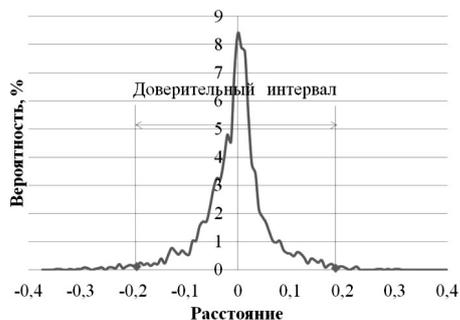


Рис. 6. Распределение разностей центров, когда нет изменений в процессе

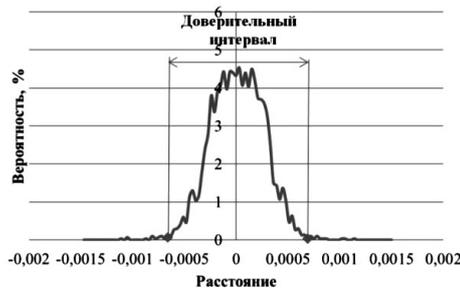


Рис. 9. Распределение разностей центров, до 30000 с

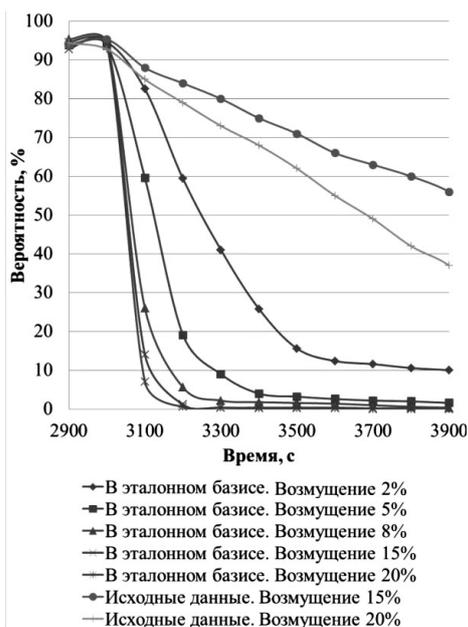


Рис. 7. Вероятность соответствия данных после возмущения исходным данным

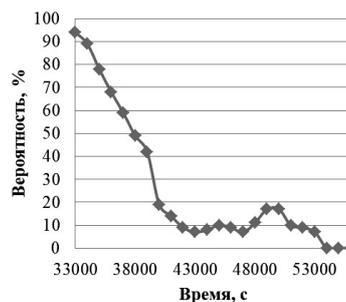


Рис. 10. Вероятность соответствия параметрам нормальной эксплуатации

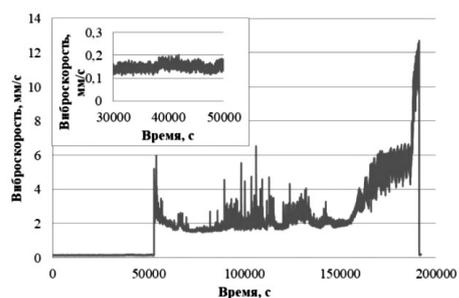


Рис. 8. СКЗ виброскорости на крышке подшипника насоса 8НДВ-Х

средние значения сместились за границы доверительного интервала. Если принять порог $P_{доп} = 50\%$, то возмущение 8, 15, 20 % обнаруживается через 100 секунд, меньшие возмущения — через 200. В соответствующие моменты оператор может получить сообщение и имеет возможность принять обоснованное решение для предотвращения отказа.

Для сравнения исходных данных предусмотрен нормативный интервал от 0,85 до 1,15. Исходные данные также сопоставлялись со своими более ранними реализациями. Как видно, при разнице математических ожиданий 15 и 20 % также снижались

вероятности попадания в нормативный интервал, но скорость снижения значительно меньше, чем у проекций. Решение, принятое на основании этой информации, может быть несвоевременным. Таким образом, показано более раннее и достоверное обнаружение за счет применения алгоритма обработки данных.

5. Апробация алгоритма на реальных данных.

Промышленный эксперимент заключался в анализе виброакустических параметров системы вибрационного контроля насоса 8НДВ-Х [1]. На подшипниковых опорах насоса установлены однокомпонентные датчики виброскорости AV04. Зарегистрированный сигнал буферизируется в течение 1 секунды, вычисляется его СКЗ и сравнивается с пороговым значением (4,5 мм/с). Применение частотных методов к анализируемому временному ряду невозможно. Архивные данные, полученные с помощью одного из датчиков, представлены на рис. 8. Это последние 55,5 часа работы оборудования до полного необратимого отказа. На четырнадцатом часу от начала архивной записи (53080 с) из-за дефекта подшипника проявилось явное отклонение состояния, которое привело к срабатыванию сигнализации системы диагностики. Однако в результате приработки значения СКЗ снизились, и сигнализацию отключили. Последующие сорок часов происходило развитие дефекта до потери работоспособности.

Обработка реальных архивных данных проводится с целью демонстрации возможности снабжения оператора системы диагностики более достоверной и своевременной информацией, чем предусмотрено существующей системой. В связи с этим рассматривается период «нормальной эксплуатации» — первые 50000 сохраненных значений. Начиная с сорокатысячного значения при увеличении масштаба можно наблюдать возмущение, похожее на ступенчатое. Проведен предварительный анализ данных до 30000 секунд. Учитывая ограни-

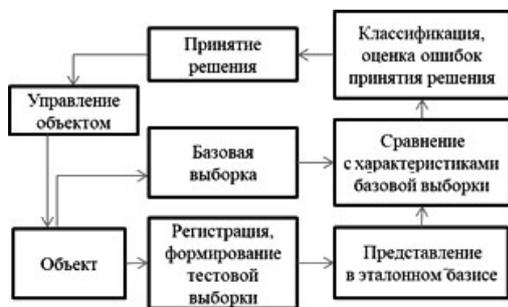


Рис. 11. Усовершенствованная функциональная схема управления состоянием объекта

ченность вычислительной мощности, данные были прорежены (из 10 отсчетов оставался один).

Выборки из первой части данных были сформированные в соответствии со схемой на рис. 3 ($N = 1000$, $p = 100$, $m = n = 500$). Результатом их обработки является распределение разностей (рис. 9), которое показывает, что, когда нет изменений в процессе, $\{d_i\}$ распределены около 0, большая часть выборки лежит внутри нормативного интервала $\pm 6,9 \cdot 10^{-4}$. Также результатом обработки является эталонный базис и координаты центров, соответствующие исправному состоянию.

Данные, зарегистрированные с тридцатитысячного отсчета, подвергались обработке согласно алгоритму, представленному на рис. 4. Результаты представлены на рис. 10. До 34000 с проекции отличались мало, и $\{d_i\}$ с вероятностью более 90 % соответствовали первым реализациям. Начиная с 34000 с наблюдается изменение проекций, которое в исходных данных незаметно. Если принять порог $P_{\text{доп}} = 50\%$, то в момент времени 38000 алгоритм формирует сообщение об отклонении. То есть информирование оператора об отклонении формируется минимум на 4,5 часа раньше, чем в исходном варианте системы. Таким образом, усовершенствованная система способствует своевременному принятию решения для предотвращения отказа.

6. Вывод. В статье рассматривается распространенный вариант системы диагностики, предполагающий классификацию состояния в соответствии с заданными порогами. Для снижения ошибок принятия решений предложено изменить схему управления состоянием объекта (рис. 1 и рис. 11). В отличие от практики обоснования пороговых значений параметров (что является комплексной проблемой) предлагается выявлять зарождающиеся дефекты на основании изменения структуры временных рядов. В качестве критерия изменения используется отклонение всех расстояний между всеми проекциями анализируемых выборок, которое рассматривается как интегральный показатель. К преимуществам описанного алгоритма следует отнести отсутствие необходимости анализа закономерности проявления разнообразных дефектов в диагностических параметрах сложного оборудования, что расширяет возможности его практического использования.

Алгоритм обработки исследован на наборах данных, сгенерированных в соответствии с заданными законами распределения. Также на реальном наборе диагностических данных продемонстрирована возможность своевременного обнаружения дефектов. Алгоритм может быть реализован в системах

диагностики широкого класса объектов (электроприводная арматура, электродвигатели, вентиляторы, насосы) при обработке не только сигналов вибрации, но и данных различной физической природы.

Для реализации алгоритма в том виде, в котором он описан, достаточно провести анализ параметров только исправного состояния. Накопление информации о поведении параметров под влиянием разных дефектов позволит его доработать для обеспечения конкретизации состояния. Внедрение систем, реализующих соответствующий алгоритм, совершенствование существующих систем будет способствовать повышению безотказности ремонтнопригодности оборудования.

Библиографический список

1. Василенко С. В., Елзов Ю. Н., Пугачева О. Ю. Автоматизированная система вибрационного контроля оборудования САЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 3. С. 83–88. EDN: VHYASJ.
2. Костюков В. Н., Костюков А. В., Тарасов Е. В., Казарин Д. В. Автоматический мониторинг «здоровья» оборудования производственно-транспортного комплекса // В мире неразрушающего контроля. 2017. Т. 20, № 3. С. 19–22. DOI: 10.12737/article_599d831d51ecf3.31879009. EDN: ZRVXFN.
3. Костюков В. Н., Науменко А. П., Федоринов И. А., Золотарев В. Н. Опыт эксплуатации систем мониторинга технического состояния поршневых компрессоров в режиме реального времени // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 5. С. 4. EDN: RCSEVH.
4. Барков А. В. Возможности нового поколения систем мониторинга и диагностики // Металлург. 1998. № 11. URL: <https://masters.donntu.ru/2007/fema/belinskaya/library/a2/art2.htm> (дата обращения: 11.04.2024).
5. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 5. Измерения и испытания / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред., гл. ред.) [и др.]. Москва: Машиностроение, 1981. 496 с.
6. ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Часть 1. Общее руководство. Введ. 01–06–2022. Москва: Российский институт стандартизации, 2022. 30 с.
7. ГОСТ 32106-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. Введ. 01–11–2014. Москва: Стандартинформ, 2014. 6 с.
8. Поваров В. П., Федоров А. И., Витковский С. Л. Некоторые аспекты повторного продления срока эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-440 на примере энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019. № 2. С. 91–104. DOI: 10.26583/npe.2019.2.08. EDN: YXJKKB.
9. Костюков В. Н., Науменко А. П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 3. С. 21–28. EDN: ISFMHT.
10. Биргер И. А. Техническая диагностика. Москва: URSS, 2019. 240 с.
11. Костюков В. Н., Зайцев А. В., Тетерин А. О. Повышение достоверности диагностирования буксовых узлов колесно-моторных блоков электропоездов // Наука, образование, бизнес: материалы Всерос. науч. практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной Дню радио, Омск, 29 апреля 2014 года. Омск: Изд-во КАН, 2014. С. 183–190. EDN: VQMEFL.
12. Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Демин А. М., Одинец А. И. Вероятностно-статистический критерий оцен-

ки состояния по параметрам виброакустического сигнала // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 113–122. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-113-122. EDN: EYLIAI.

13. Moskvina V., Zhigljavsky A. An Algorithm Based on Singular Spectrum Analysis for Change-Point Detection // Communication in Statistics-Simulation and Computation. 2003. Vol. 32 (2). P. 319–352. DOI: 10.1081/SAC-120017494.

14. Абидова Е. А. Методика формирования многоканальной системы технической диагностики с оценкой целесообразности использования измерительных каналов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 41–48. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-4-41-48. EDN: AKEURP.

15. Абидова Е. А., Ратушный В. И. Регистрация и обработка сигналов в измерительном комплексе контроля протечек трубопроводной арматуры атомной электростанции. Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124. EDN: VNP KYM.

АБИДОВА Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск.

ORCID: 0000-0003-0258-5543

Адрес для переписки: 1nii_energomash@mail.ru

Для цитирования

Абидова Е. А. Алгоритм обработки данных в задаче управления состоянием оборудования // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 125–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-125-133.

Статья поступила в редакцию 16.03.2024 г.

© Е. А. Абидова

DECISION SUPPORT ALGORITHM TO PREVENT HARDWARE FAILURES

Diagnostic systems implemented at many industrial facilities are designed to detect defects in a timely manner, thereby prevent sudden failures with subsequent equipment downtime, accompanied by economic losses. Most diagnostic systems are based on making a decision about the serviceability or malfunction of an object based on comparing diagnostic parameters with threshold values. The problem with this approach is that going beyond the set limits is fixed after the equipment has lost maintainability or requires complex expensive repairs. Therefore, the goal is early and reliable detection of defects in electromechanical equipment. The goal is achieved by developing an algorithm for detecting the beginning of a deviation in a time series consisting of sequentially recorded diagnostic parameters. The algorithm is based on the consistent application of singular spectrum analysis and allows not only timely detecting of deviations, but also assessing the probability of a decision error. Data processing algorithm is investigated on data sets generated in accordance with the specified laws of change. Moreover, the possibility of timely and reliable detection of defects has been demonstrated on a real set of diagnostic data. The implementation of the algorithm in the management of equipment condition will contribute to improving the safety and efficiency of production facilities.

Keywords: diagnostic system, vibration control, detection of changing points, state management, decision errors, singular spectral analysis.

References

1. Vasilenko S. V., Elzhov Yu. N., Pugacheva O. Yu. Avtomatizirovannaya sistema vibratsionnogo kontrolya oborudovaniya SAES [Automated system of vibration monitoring of SNPP equipment] // *Global'naya yadernaya bezopasnost'. Global Nuclear Safety*. 2015. No. 3. P. 83–88. EDN: VHYASJ. (In Russ.).
2. Kostyukov V. N., Kostyukov A. V., Tarasov E. V., Kazarin D. V. Avtomaticheskii monitoring «zdorov'ya» oborudovaniya proizvodstvenno-transportnogo kompleksa [Automatic health monitoring of the equipment for the production and transport complex] // *V mire nerazrushayushchego kontrolya. NDT World Review*. 2017. Vol. 20, no. 3. P. 19–22. DOI: 10.12737/article_599d831d51ecf3.31879009. EDN: ZRVXFN. (In Russ.).
3. Kostyukov V. N., Naumenko A. P., Fedorin I. A., Zolotarev V. N. Opyt ekspluatatsii sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnykh kompressorov v rezhime real'nogo vremeni [Operating experience of systems for real-time technical state monitoring of piston compressors] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2013. No. 5. P. 4. EDN: RCSEVH. (In Russ.).
4. Barkov A. V. Vozможности novogo pokoleniya sistem monitoringa i diagnostiki [Capabilities of the new generation of monitoring and diagnostics systems] // *Metallurg. Metallurg*. 1998. No. 11. URL: <https://masters.donntu.ru/2007/fema/belinskaya/library/a2/art2.htm> (accessed: 11.04.2024). (In Russ.).
5. Vibratsii v tekhnike: spravochnik. V 6 t. T. 5. Izmereniya i ispytaniya [Vibrations in engineering: handbook. In 6 vols. Vol. 5. Measurements and tests] / Editorial board: V. N. Chelomey (chairman, chief ed.) [et al.]. Moscow, 1981. 496 p. (In Russ.).
6. GOST R ISO 20816-1-2021. Vibratsiya. Izmereniya vibratsii i otsenka vibratsionnogo sostoyaniya mashin. Chast' 1. Obshcheye rukovodstvo [Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1. General guidelines]. Moscow, 2022. 30 p. (In Russ.).
7. GOST 32106-2013. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring sostoyaniya oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Vibratsiya tsentrobezhnykh nasosnykh i kompressornykh agregatov [Condition monitoring and diagnostics of machines. Hazardous equipment monitoring. Vibration generated by rotodynamic pump and compressor units]. Moscow, 2014. 6 p. (In Russ.).
8. Povarov V. P., Fedorov A. I., Vitkovskiy S. L. Nekotoryye aspekty povtornogo prodleniya sroka ekspluatatsii reaktornoy ustanovki s VVER-440 na primere energobloka № 4 Novovoronezhskoy AES [Some aspects of the re-extension of the reactor plant life with VVER-440 on the example of novovoronezh npp Unit 4] // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika. Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019. No. 2. P. 91–104. DOI: 10.26583/npe.2019.2.08. EDN: YXJKKB. (In Russ.).
9. Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Problemy i resheniya bezopasnoy ekspluatatsii porshnevnykh kompressorov [Problems and solutions of safe operation of piston compressors] // *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika. Compressor Technology and Pneumatics*. 2008. No. 3. P. 21–28. EDN: ISFMHT. (In Russ.).
10. Birger I. A. Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics]. Moscow, 2019. 240 p. (In Russ.).
11. Kostiukov V. N., Zaitsev A. V., Teterin A. O. Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya buksovykh uzlov kolesno-motornykh blokov elektropoezdov [Increasing the reliability of diagnosing axlebox units of wheel-motor units of electric trains] // *Nauka, obrazovaniye, biznes. Science, Education, Business. Omsk*. 2014. P. 183–190. EDN: VQMEFL. (In Russ.).
12. Kudryavtseva I. S., Naumenko A. P., Demin A. M., Odinets A. I. Veroyatnostno-statisticheskiy kriteriy otsenki sostoyaniya

po parametram vibroakusticheskogo signala [Probabilistic and statistical criteria for assessing the condition by vibroacoustic signal parameters] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 113–122. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-113-122. EDN: EYLLAI. (In Russ.).

13. Moskvina V., Zhigljavsky A. An Algorithm Based on Singular Spectrum Analysis for Change-Point Detection // *Communication in Statistics-Simulation and Computation*. 2003. Vol. 32 (2). P. 319–352. DOI: 10.1081/SAC-120017494. (In Engl.).

14. Abidova E. A. Metodika formirovaniya mnogokanal'noy sistemy tekhnicheskoy diagnostiki s otsenkoy tselesoobraznosti ispol'zovaniya izmeritel'nykh kanalov [The methodology of forming a multichannel system of technical diagnostics with an assessment of the feasibility of using measuring channels] // *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2023. No. 4. P. 41–48. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-4-41-48. (In Russ.).

15. Abidova E. A., Ratushnyy V. I. Registratsiya i obrabotka signalov v izmeritel'nom komplekse kontrolya protechek truboprovodnoy armatury atomnoy elektrostantsii [Registration and signal processing in measuring system for monitoring

leaks of NPP pipeline fittings] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124. EDN: VNP KYM. (In Russ.).

ABIDOVA Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information and Control Systems Department, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology – branch of the National Research Nuclear University «MEPHI», Volgodonsk.

ORCID: 0000-0003-0258-5543

Correspondence address: 1nii_energomash@mail.ru

For citations

Abidova E. A. Decision support algorithm to prevent hardware failures // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 125–133. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-125-133.

Received March 16, 2024.

© E. A. Abidova

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОК-ЧАСТОТА НА ОСНОВЕ ОСЦИЛЛИСТОРНОГО ЭФФЕКТА

Рассматривается возможность построения измерительных преобразователей постоянного тока, осуществляющих прямое преобразование тока в частоту переменного тока. Чувствительный элемент преобразователя представляет собой германиевый осциллятор. Приведены зависимости частоты от тока, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований. Представлена конструкция преобразователя ток-частота и приведены его характеристики.

Ключевые слова: электронно-дырочная плазма, преобразователь, осциллятор, колебания тока, частота, электрическое поле, напряженность.

Введение. Большинство измерительных преобразователей (ИП), применяющихся при построении средств измерений электрических, магнитных и других величин, в качестве информативного параметра выходного сигнала используют его амплитуду. Следовательно, проектирование цифровых измерительных устройств и сопряжение их с вычислительной техникой в процессе измерений обуславливает необходимость дополнительного преобразования сигнала в код или величину, легко преобразующуюся в код, например, частоту. Дополнительные преобразования усложняют средство измерения и снижают его точность. При построении цифровых средств измерений предпочтительнее использовать ИП с частотным выходным сигналом. Такой сигнал обладает следующими достоинствами: а) легко преобразуется в цифровой код; б) имеет высокую степень помехозащищенности; в) характеризуется малыми потерями информации при передаче по линии связи. Поэтому разработка ИП физических величин непосредственно в частоту, минуя промежуточное преобразование, является актуальной задачей. Ряд физических эффектов и явлений в твердых телах позволяет реализовать измерительные преобразователи с частотным выходным сигналом. Примерами таких эффектов являются эффект Ганна и акустоэлектрический эффект, на основе которых создаются частотные преобразователи напряжения [1, 2].

В настоящее время исследовано множество неустойчивостей в твердых телах. Особый интерес представляют неустойчивости в электронно-дырочной полупроводниковой плазме. Особенность некоторых типов неустойчивостей в полупроводниковой плазме — это возникновение электрических колебаний тока или напряжения, следовательно, появляется возможность построения ИП с частотным выходом. Осцилляторный эффект заключается в возникновении колебаний электрического тока, протекающего по образцу при воздействии электрического и магнитного поля [3]. В основе осцилляторного эффекта лежит явление винтовой не-

устойчивости электронно-дырочной плазмы образца из полупроводникового материала, помещенного в электрическое и магнитное поля [4]. Образцы, в которых он возникает, получили название «осцилляторов».

На частоту колебаний тока в осцилляторе влияют различные факторы, например, величина магнитного и электрического поля, параметры плазмы и многие другие [5]. Благодаря этим особенностям возможно построение ИП различных физических величин с частотным выходом [6–9].

Целью настоящей работы является исследование зависимости частоты колебаний тока в осцилляторе из *n*-германия от протекающего по нему тока и разработка преобразователя ток-частота (ПТЧ) на основе осцилляторного эффекта.

Теория. Данный эффект проявляется при выполнении некоторых условий:

1) наличие магнитного и электрического полей, напряженности которых превышают некоторые пороговые значения;

2) наличие в объеме осциллятора электронно-дырочной плазмы. Электрическое поле создается путём приложения напряжения к электродам, выполненным на торцевых гранях осциллятора. Магнитное поле создается с помощью постоянных магнитов.

Электронно-дырочная плазма в объеме осциллятора может быть получена различными способами. Наиболее распространенным является способ, при котором плазма создается с помощью инжектирующих контактов. Данные контакты могут выполняться как на торцевых (рис. 1а), так и на боковых (рис. 1б) гранях осциллятора. Этот способ позволяет осуществить двойную (биполярную) инжекцию, при которой с одного контакта инжектируются дырки, а с другого — электроны. Следует отметить, что в случае инжекции с торцевых контактов последние выполняют двойную функцию, т.е. являются одновременно инжектирующими и полевыми. При этом изменение тока сопровождается изменением приложенного к осциллятору напряжения.

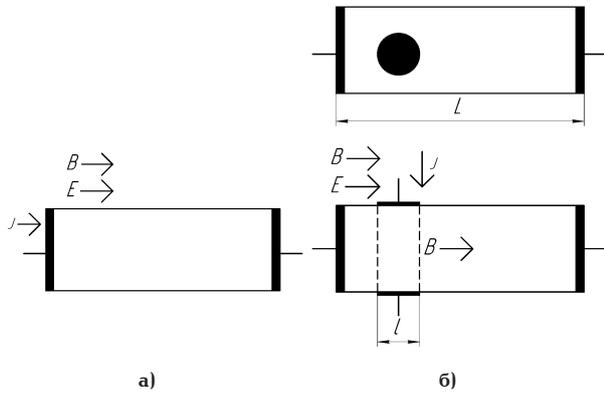


Рис. 1. Осциллистор:
а) с торцевым инжектирующим контактом;
б) с боковым инжектирующим контактом

При превышении электрического и магнитного полей критических значений в осциллисторе возбуждается винтовая неустойчивость электронно-дырочной плазмы, развитие которой приводит к появлению колебаний тока, протекающего по осциллистору, и колебаний электрического потенциала на его боковых гранях. Причем частота колебаний потенциала равна частоте колебаний тока.

Частота генерации осциллистора из несобственного полупроводника зависит от напряженности электрического поля, определяется амбиполярным сносом винтового возмущения и находится как [10]:

$$f_E = \frac{K}{2\pi} \mu_a E, \quad (1)$$

где K — волновое число; μ_a — амбиполярная подвижность; E — напряженность электрического поля. Для собственного (или близкого к собственному) полупроводника частота зависит от индукции магнитного поля, определяется вращением винтового возмущения и находится как:

$$f_B = -\frac{20D_a}{9\pi a^2} (\mu_n - \mu_p) B, \quad (2)$$

где D_a — коэффициент амбиполярной диффузии; μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок; $2a$ — поперечный размер осциллистора; B — индукция магнитного поля.

В общем случае в полупроводниках одновременно происходит амбиполярный снос и вращение винтового возмущения и из выражений (1) и (2) можно получить формулу для частоты в виде:

$$f \cong \frac{0,18\mu_a}{a} E + \frac{0,71D_a(\mu_n - \mu_p)}{a^2} B, \quad (3)$$

где $\mu_a = \frac{\mu_n \mu_p (n_0 - p_0)}{\mu_n n_0 + \mu_p p_0}$; $D_a = \frac{n_0 \mu_n D_p + p_0 \mu_p D_n}{\mu_n n_0 + \mu_p p_0}$; μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок; n_0 и p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок; D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок.

В работе [11] установлено, что частота колебаний тока определяется параметрами электронно-дырочной плазмы и размерами осциллистора в месте возникновения винтовой неустойчивости.

Увеличение плотности инжектирующего тока приводит к возрастанию концентрации электронов и дырок в месте возбуждения абсолютной винтовой неустойчивости и, соответственно, уменьшению частоты, что можно использовать для создания ПТЧ. Следует отметить, что в случае использования торцевых инжектирующих контактов увеличение тока сопровождается повышением приложенного к осциллистору напряжения, что должно приводить к увеличению частоты. Такое действие данных факторов может привести к тому, что частота будет слабо зависеть от изменения плотности инжектирующего тока и при определенном значении тока частота перестанет изменяться.

Теоретические и экспериментальные исследования. При получении электронно-дырочной плазмы с помощью расположенных аксиально боковых контактов (рис. 1б) инжектирующие и полевые контакты разделяются.

При таком способе инжекции в осциллисторе можно условно выделить две области. В первой (области инжекции) напряженность электрического поля E_{π} зависит от концентрации инжектированных носителей и изменяется при изменении уровня инжекции (инжектирующего тока). Вторая область включает в себя остальную часть осциллистора и напряженность E_0 в ней определяется напряжением U , приложенным к торцевым омическим контактам. Причем при $L \gg l$ можно считать, что $E_0 = U/L$. Так как напряженность порогового поля E_{π} уменьшается при увеличении концентрации электронно-дырочной плазмы, критерий возбуждения осциллистора более легко выполняется в области инжекции носителей зарядов, чем в остальной части образца. Средняя плотность инжектированных носителей ($\Delta p = \Delta n$) между инжектирующими контактами при достаточно высоком уровне инжекции находится по формуле [12]:

$$\Delta p \approx \sqrt{\frac{(n_0 - p_0) \mu_n \mu_p \tau I}{qa(\mu_n + \mu_p)^2}}, \quad (4)$$

где $\tau = \tau_n = \tau_p$ — время жизни электронов и дырок; n_0 и p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок; q — заряд электрона; I — плотность тока.

Зависимость частоты от плотности инжектирующего тока, при постоянном напряжении, приложенном к осциллистору, будет обуславливаться изменением концентрации плазмы в объеме осциллистора.

В случае инжектированной плазмы концентрации электронов n и дырок p равны:

$$n \approx n_0 + \Delta n; \quad p \approx p_0 + \Delta p. \quad (5)$$

Подставив (5) в выражения μ_a и D_a и преобразуя формулу (3), получим:

$$f \cong \frac{\sqrt{qa} \mu_n (n_0 - p_0) E}{\pi a [\sqrt{3qa} (\mu_n n_0 + \mu_p p_0) + \sqrt{3(n_0 - p_0) \mu_n \mu_p \tau I}]} + \frac{20 \left[\sqrt{qa} (\mu_n + \mu_p) (\mu_n D_p n_0 + \mu_p D_n p_0) + (\mu_n D_p + \mu_p D_n) \sqrt{\mu_n \mu_p (n_0 - p_0) \tau I} \right] B}{9\pi a^2 [\sqrt{qa} (\mu_n n_0 + \mu_p p_0) + \sqrt{\mu_n \mu_p (n_0 - p_0) \tau I}]}, \quad (6)$$

Пренебрегая собственным вращением возмущения, в силу его малости по сравнению с амбиполярным сносом, частота будет определяться первым

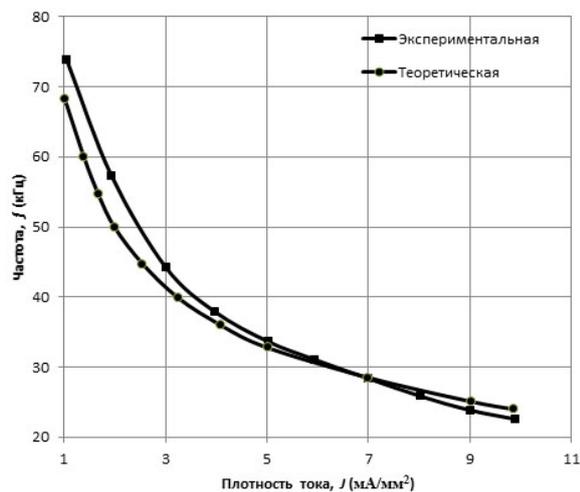


Рис. 2. Зависимость частоты от плотности инжектирующего тока

членом в правой части формулы (6). При сильном уровне инжекции, когда выполняется условие ($\Delta p \approx \Delta n \gg n_0, p_0$), после несложных преобразований получаем приблизительную оценку зависимости частоты от плотности инжектирующего тока I :

$$f \approx \frac{E}{\pi} \sqrt{\frac{q\mu_n\mu_p(n_0 - p_0)}{3\alpha t I}} = \frac{k}{\sqrt{I}}. \quad (7)$$

Переходя в формулах (6) и (7) от плотности тока к току, получим выражения, описывающие зависимость частоты от тока, протекающего через инжектирующие контакты.

На рис. 2 представлены экспериментальная и теоретическая, рассчитанная по формуле (6), зависимости частоты от плотности тока для осциллятора из n -германия размерами $1 \times 1 \times 4$ мм³.

Сопоставление экспериментальной и теоретических зависимостей показало хорошее соответствие. При этом необходимо отметить, что полученные зависимости частоты выведены на основе линейной теории осцилляторного эффекта и использовались приближенные выражения для Δp . Кроме того, не учитывалось влияние собственного магнитного поля, изменение напряженности электрического поля вдоль осциллятора, конечность длины образца и другие факторы, которые приводят к различным нелинейным эффектам. Получение аналитического выражения зависимости частоты от плотности инжектирующего тока с учетом нелинейных характеристик осцилляторного эффекта в настоящее время не представляется возможным. Анализ показывает, что, несмотря на значительное количественное несовпадение экспериментальных и теоретических результатов, достигающее в отдельных точках 20 %, расчет по формулам (6), (7) позволяет оценить коэффициент преобразования плотности тока в частоту.

Таким образом, проведенные эксперименты показали возможность использования осциллятора для построения преобразователей постоянного тока в частоту, характеризующихся высокой чувствительностью. Среднее значение отрицательной чувствительности составляет $S \approx 4,5$ кГц/(мА/мм²) в диапазоне (1–10) мА.

Технология изготовления чувствительного элемента ПТЧ (осциллятора), схемы его подключения

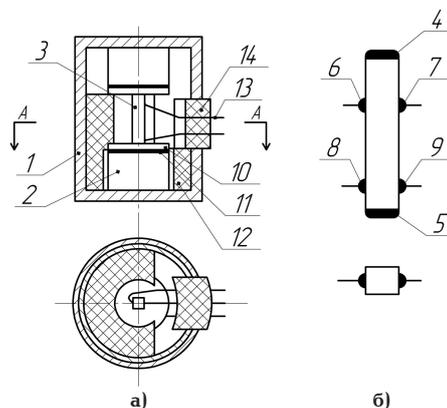


Рис. 3. Преобразователь ток-частота: а) конструкция ПТЧ; б) конструкция чувствительного элемента

к источнику напряжения и вывода осцилляторных колебаний во внешнюю цепь рассмотрены в [13].

Общий вид преобразователя представлен на рис. 3а. В корпусе 1 из технически чистого железа Армо расположены постоянные магниты 2, которые предназначены для создания в рабочем зазоре $4,2$ мм магнитной индукции $B \geq B_{п}$ (пороговая индукция $B_{п} = 0,3$ Тл) и выполнены из $SmCo_5$ в виде таблеток диаметром $5,5$ мм и толщиной 3 мм. Чувствительный элемент (осциллятор) 3, изготовленный из германия ГЭС 30 в виде параллелепипеда размерами $1 \times 1 \times 4$ мм³, расположен в зазоре между магнитами 2. Элемент 3 имеет торцевые контакты 4 и 5, которые подключаются к источнику напряжения, и две пары боковых контактов. Торцевые контакты 4 и 5 (рис. 3б) выполнены омическими из олова. Пара боковых контактов 6 и 7, предназначенная для включения в цепь измеряемого тока, выполнена аксиально на расстоянии $0,8$ миллиметра от торцевого контакта 4, подключаемого к положительному полюсу источника напряжения. Контакт 6 выполнен из олова, а контакт 7 — из индия. Вторая пара боковых контактов 8 и 9 выполнена из олова на расстоянии $0,5$ мм от контакта 5 и предназначена для снятия осцилляторных колебаний. Торцевые контакты 4, 5 припаиваются к контактными площадкам 10 из меди, которые изолируются от магнитов 2 прокладками 11. Для закрепления осциллятора в магнитной системе используется втулка 12 из органического стекла, к которой приклеиваются контактные площадки 10. Включение осциллятора в цепь измеряемого тока и измерительную цепь осуществляется через выводы 13, которые закреплены в держателе 14. Для настройки преобразователя в верхней части крышки корпуса 1 выполнено отверстие, позволяющее перемещать в небольших пределах один из постоянных магнитов 2. После настройки положение магнита фиксируется с помощью эпоксидной смолы. Для повышения стабильности работы преобразователя корпус 1 заполнен силиконовым маслом, при этом защищается поверхность осциллятора и улучшается тепловой режим его работы.

На рис. 4 представлена схема включения преобразователя в измерительную цепь. Электрическое поле в осцилляторе 1 создается приложением напряжения к его торцевым контактам 4 и 5 от источника постоянного напряжения 2, а магнитное поле, в которое помещается осциллятор 1, создается постоянными магнитами 3. При протекании пре-

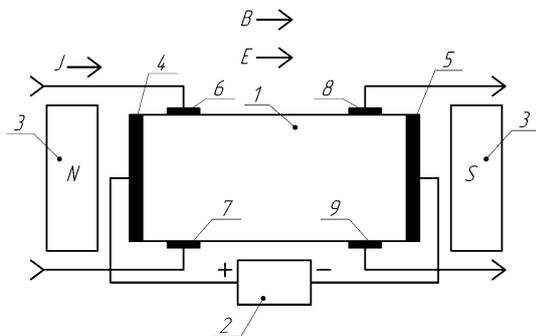


Рис. 4. Схема включения преобразователя в измерительную цепь: 1 — осциллятор из *n*-Ge; 2 — источник постоянного напряжения; 3 — постоянные магниты из *SmCo₅*; 4, 5, 7, 8, 9 — контакты из Sn; 6 — контакты из In

образуемого (измеряемого) тока J через боковые контакты 6 и 7 в осцилляторе 1 возникают колебания продольного тока, создаваемого источником 2. Выше отмечено, что одновременно с колебаниями продольного тока на боковой поверхности осциллятора возникают колебания напряжения (потенциала). Вывод колебаний напряжения в осцилляторе во внешнюю цепь осуществляется с помощью омических контактов 8 и 9, выполненных аксиально на боковых гранях осциллятора 1. Переменное напряжение, частота которого зависит от инжектирующего тока, подается на блок обработки выходного сигнала преобразователя.

Заключение. Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований зависимости частоты осцилляторных колебаний от инжектирующего тока показывает возможность использования осцилляторного эффекта для построения преобразователей постоянного тока с частотным выходным сигналом, осуществляющих непосредственное преобразование тока в частоту и обладающих высокой чувствительностью.

Чувствительный элемент (осциллятор) преобразователя помещен в магнитное поле трубчатой магнитной системы, что позволяет защитить его от механических повреждений и действия внешних электромагнитных полей. Преобразователь характеризуется высокой чувствительностью. Чувствительность в диапазоне $(1,0-10,0)$ мА/мм² достигает значения — 4,5 кГц/(мА/мм²) при нелинейности характеристики преобразования 15 %, а диапазоне $(1,0-3,0)$ мА/мм² чувствительность $S \approx -(12-15)$ кГц/(мА/мм²). В диапазоне $(1,0-3,0)$ мА/мм² нелинейность имеет значение менее 1 %.

Библиографический список

1. Li W., Liu L., Shi R. [et al.]. Acoustoelectric Voltage Sensor Based on S0 Mode Lamb Wave Resonator with Millivolt Resolution // 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Montreal, QC, Canada. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/IUS51837.2023.10306502.
2. Малышев И. В., Осадчий Е. Н. Применение сильных постоянных магнитных и электрических полей для создания новых объёмных полупроводниковых преобразовательных уз-

лов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2019. № 6 (208). С. 70–85.

3. Gliksman M. Instabilities of a cylindrical electron-hole plasma in a magnetic field // Physical Review. 1961. Vol. 124. P. 1655–1664. DOI: 10.1103/PhysRev.124.1655.

4. Иванов Ю. Л., Рывкин М. Возникновение колебаний тока в образцах германия, помещенных в электрическое и продольное магнитное поле // Журнал технической физики. 1958. Т. 28. С. 54–56.

5. Владимиров В. В., Волков А. Ф., Мейлихов Е. З. Плазма полупроводников. Москва: Атомиздат, 1979. 254 с.

6. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V., Akhmedzhanov R. A., Korenev E. O. Magnetically sensitive converter of the magnetic field gradient based on oscillistor // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239443.

7. Shchelkanov A. V., Cheredov A. I. Oscillistor-based force sensor // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1546. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012002.

8. Gaman V. I., Drobot P. N. Oscillistor sensors with a frequency output based on a silicon structures // Electronic Instrument Engineering Proceedings. APEIE-98. 1998. Vol. 1. P. 133–135. DOI: 10.1109/APEIE.1998.768930.

9. Дробот П. Н., Дробот Д. А. Осцилляторные сенсоры с частотным выходом // Южно-сибирский научный вестник. 2012. № 1. С. 120–123. EDN: PAGHTH.

10. Hurwitz C. E., McWhorter A. L. Growing helical density waves in a semiconductor plasmas // Physical Review Letters. 1964. Vol. 134 (4A). P. 1033–1050. DOI: 10.1103/PhysRev.134.A1033.

11. Викулин И. М., Люзе Л. Л., Преснов В. А. Частота винтовой неустойчивости в осцилляторах // Физика и техника полупроводников. 1968. Т. 2, № 8. С. 1138–1143.

12. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. Москва: Мир, 1973. 416 с.

13. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Angular displacement sensor based on oscillistor effect // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 012104-1-012104-7. DOI:10.1088/1742-6596/1901/1/012104.

ЧЕРЕДОВ Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6957-1660

AuthorID (РИНЦ): 471995

ЩЕЛКАНОВ Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2564-1461

AuthorID (SCOPUS): 56447045400

ORCID: 0000-0002-1354-8708

ResearcherID: P-9053-2015

Адрес для переписки: shchelkanov@omgtu.ru

Для цитирования

Чередов А. И., Щелканов А. В. Преобразователь токовой частоты на основе осцилляторного эффекта // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 134–138. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-134-138.

Статья поступила в редакцию 22.05.2024 г.

© А. И. Чередов, А. В. Щелканов

CURRENT-TO-FREQUENCY CONVERTER BASED ON OSCILLISTOR EFFECT

The possibility of direct current measuring converters construction measuring converted direct current, realizing straightdirect current-to-frequency conversion of current into frequency of alternating current or voltage is considered. An oscillistor made of electronic germanium is used as an element realizing this conversion. The dependences of frequency on current obtained in the course of theoretical and experimental studies are given. The device of the current-frequency converter is shown and its characteristics are given.

Keywords: converter, oscillistor, current fluctuations, frequency, electric field, voltage, electron-hole plasma, transducer, oscillisator, current oscillations, frequency, electric field, field strengthintensity.

References

1. Li W., Liu L., Shi R. [et al.]. Acoustoelectric Voltage Sensor Based on S0 Mode Lamb Wave Resonator with Millivolt Resolution // 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Montreal, QC, Canada. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/IUS51837.2023.10306502. (In Engl.).
2. Malyshev I. V., Osadchiy E. N. Primeneniye sil'nykh postoyannykh magnitnykh i elektricheskikh poley dlya sozdaniya novykh ob'yemnykh poluprovodnikovyykh preobrazovatel'nykh uzlov [The use of strong constant magnetic and electric fields to create a new type of bulk semiconductor converter units] // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2019. No. 6 (208). P. 70–85. (In Russ.).
3. Gliksmann M. Instabilities of a cylindrical electron-hole plasma in a magnetic field // *Physical Review*. 1961. Vol. 124. P. 1655–1664. DOI: 10.1103/PhysRev.124.1655. (In Engl.).
4. Ivanov Yu. L., Ryvkin M. Vozniknoveniye kolebaniy toka v obraztsakh germaniya, pomeshchennykh v elektricheskoye i prodol'noye magnitnoye pole [Occurrence of current oscillations in germanium samples placed in an electric and longitudinal magnetic field] // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. Journal of Technical Physics*. 1958. Vol. 28. P. 54–56. (In Russ.).
5. Vladimirov V. V., Volkov A. F., Meylikhov E. Z. Plazma poluprovodnikov [Semiconductor plasma]. Moscow, 1979. 254 p. (In Russ.).
6. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V., Akhmedzhanov R. A., Korenev E. O. Magnetically sensitive converter of the magnetic field gradient based on oscillistor // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239443. (In Engl.).
7. Shchelkanov A. V., Cheredov A. I. Oscillistor-based force sensor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1546. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012002. (In Russ.).
8. Gaman V. I., Drobot P. N. Oscillistor sensors with a frequency output based on a silicon structures // *Electronic Instrument Engineering Proceedings. APEIE-98*. 1998. Vol. 1. P. 133–135. DOI: 10.1109/APEIE.1998.768930. (In Engl.).
9. Drobot P. N., Drobot D. A. Ostsillistornyye sensory s chastotnym vykhodom [Oscillistor sensors with a frequency out-

put] // *Yuzhno-sibirskiy nauchnyy vestnik. South-Siberian Scientific Bulletin*. 2012. No. 1. P. 120–123. EDN: PAGHTH. (In Russ.).

10. Hurwitz C. E., McWhorter A. L. Growing helical density waves in a semiconductor plasmas // *Physical Review Letters*. 1964. Vol. 134 (4A). P. 1033–1050. DOI: 10.1103/PhysRev.134.A1033. (In Engl.).

11. Vikulin I. M., Lyuze L. L., Presnov V. A. Chastota vintovoy nestabil'nosti v ostsillistorakh [Frequency of helical instability in oscillistors] // *Fizika i tekhnika poluprovodnikov. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 1968. Vol. 2, no. 8. P. 1138–1143. (In Russ.).

12. Lampert M., Mark P. Inzheksionnyye toki v tverdykh telakh [Current Injection in Solids]. Moscow, 1973. 416 p. (In Russ.).

13. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Angular displacement sensor based on oscillistor effect // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1901. P. 012104-1-012104-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012104. (In Engl.).

CHEREDOV Aleksandr Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 6957-1660

AuthorID (RSCI): 471995

SHCHELKANOV Andrey Vladimirovich, Senior Lecturer of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2564-1461

AuthorID (SCOPUS): 56447045400

ORCID: 0000-0002-1354-8708

ResearcherID: P-9053-2015

Correspondence address: shchelkanov@omgtu.ru

For citations

Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Current-to-frequency converter based on oscillistor effect // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 134–138. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-134-138.

Received May 22, 2024.

© A. I. Cheredov, A. V. Shchelkanov

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА ЦИФРОВОГО ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА С ТЕРМОДАТЧИКОМ НА ОСНОВЕ ДВУХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В статье дана теоретическая предельная оценка стабильности цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов. Получены результаты: 7,5 ppb (для беспокойной среды) и 0,75 ppb (для спокойной среды). Исследованы технические решения получения линейной однозначной зависимости значения разностной частоты от температуры и увеличения крутизны этой зависимости, позволяющие получать разрешение по измерению температуры до 0,001 °С.

Ключевые слова: термодатчик, кварцевый генератор, термокомпенсация, температурная стабильность, спокойная среда, беспокойная среда.

Актуальность. В современном развитии систем телекоммуникаций, геопозиционирования, телеуправления и измерительной техники одну из главных ролей играет источник стабильной опорной частоты, который во многом определяет характеристики перечисленных систем. В большинстве случаев таким источником является термокомпенсированный кварцевый генератор (ТККГ). В то же время современное развитие микросхем цифровой обработки сигналов эффективно способствует развитию цифровых методов термокомпенсации кварцевых генераторов, способных учитывать термодинамические особенности их функционирования [1, 2]. Таким образом, высокие характеристики цифрового ТККГ (ЦТККГ), такие как производительность счётно-решающего устройства (микроконтроллера или ПЛИС), точность измерения температуры и эффективность алгоритма формирования компенсирующей функции являются решающими в обеспечении высокой стабильности ЦТККГ. Одной из этих характеристик является точность измерения температуры термодатчиком (ТД), что будет всегда являться актуальной задачей для исследователей.

Введение. Термокомпенсации кварцевых генераторов посвящено много трудов. Отдельным направлением поиска эффективных методов термокомпенсации стало использование самих кварцевых

генераторов в качестве термодатчиков схем термокомпенсации. В названном качестве использование кварцевого генератора нашло два подхода.

Первый — использование термочувствительной механической моды кварцевого резонатора, возбуждаемого одновременно на двух модах [3–6]. Одна мода (основная) является полезным продуктом работы генератора, частоту которой необходимо корректировать в результате влияния изменения температуры, а вторая мода — термочувствительная, является носителем информации в виде зависимости частоты второй моды от температуры.

Второй подход — использование отдельного кварцевого генератора (или двух) в качестве термодатчика. Наиболее близкими аналогами исследуемым в настоящей статье техническим решениям являются [6] и [7], где были предложены способы термокомпенсации использованием двух генераторов, имеющих в своём составе резонаторы с различными типами срезов (АТ и У или АТ и БТ). Обработка сигналов (меандров) двух генераторов происходит во временной области оперированием зависимыми от температуры периодами двух импульсных последовательностей (меандров) от названных генераторов, один из которых в результате алгоритма обработки этих последовательностей подстраивается для компенсации собственного температурного дрейфа.

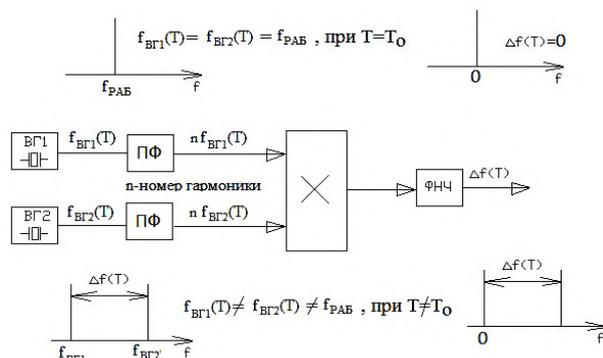


Рис. 1. Структурная схема термодатчика на основе двух вспомогательных генераторов

Максимальное концептуальное сходство с исследуемыми в настоящей работе решениями отмечается в работах [8] и [9], но в указанных работах предлагаются сложные способы вычисления значения температуры, использующие сигнальные процессоры и цифровую обработку сигналов.

В отличие от описанных выше способов — [7], [10], [8] и [11], в настоящей статье исследуется решение с использованием в термодатчике двух вспомогательных кварцевых генераторов, как в [12].

Цель работы — определить теоретический предел возможного повышения стабильности частоты для термокомпенсированного кварцевого генератора. Для достижения цели в статье подробно исследуется способ повышения разрешающей способности измерения термодатчика на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов; структура ТККГ с цифровой термокомпенсацией; описание сделанных допущений.

Новым в предлагаемой работе является поиск теоретического предела достижения стабильности частоты термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов с учётом описываемых в статье допущений.

Термодатчик на основе двух вспомогательных генераторов. Структурная схема рассматриваемого термодатчика, использующего свойство строгой зависимости отклонения частоты кварцевого генератора от температуры, изображена на рис. 1.

Как известно, вид температурно-частотной характеристики (ТЧХ) резонатора АТ-среза зависит от значения угла среза [13]. На рис. 2 изображено семейство ТЧХ резонаторов АТ для углов среза $+35^\circ$, используемых в рассматриваемом ТД.

На рис. 2: ТЧХ ВГ1 (угол АТ-среза: $+35^\circ + 16'$) и ТЧХ ВГ2 (угол АТ-среза: $+35^\circ - 4'$) — ТЧХ первого вспомогательного генератора и второго вспомогательного генератора соответственно (рис. 1), ТЧХ ПГ (угол АТ-среза: $+35^\circ + 4'$ — наиболее широко используемый срез) — ТЧХ подстраиваемого генератора (ПГ), которую необходимо термокомпенсировать. Температура точки перегиба для приведённых ТЧХ одинаковая: $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

Выражение, описывающее ТЧХ АТ-среза, измеряющееся в относительных единицах на миллион ($1 \cdot 10^{-6}$), или ppm [14]:

$$\delta(T) = [a_{00}(T - T_0) + b_{00}(T - T_0)^2 + c_{00}(T - T_0)^3] \cdot 10^6, \quad (1)$$

где a_{00} , b_{00} , c_{00} — температурные коэффициенты соответственно первого, второго и третьего порядков, числовые значения которых зависят от свойств пластины кварца резонатора.

Функционирование исследуемого термодатчика осуществляется следующим образом. При темпера-

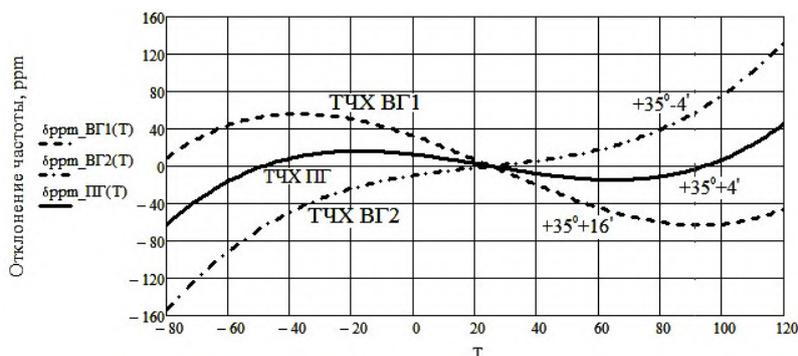


Рис. 2. Семейство ТЧХ резонаторов АТ для различных значений угла среза, используемых в ВГ и ПГ

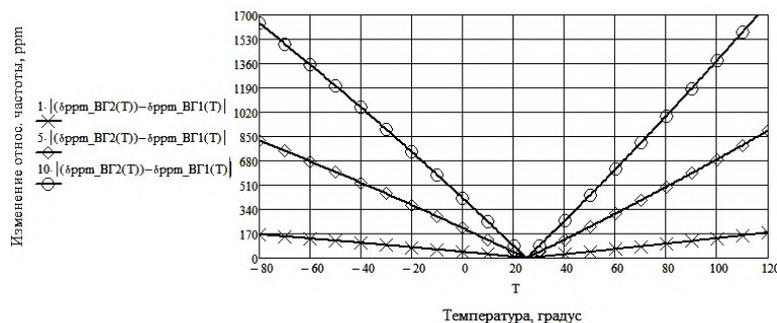


Рис. 3. Изменение относительной разностной частоты от температуры

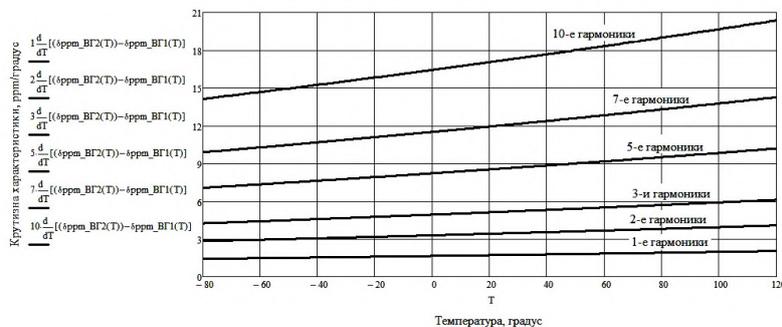


Рис. 4. Графики скорости изменения (крутизны) относительной разностной частоты от температуры

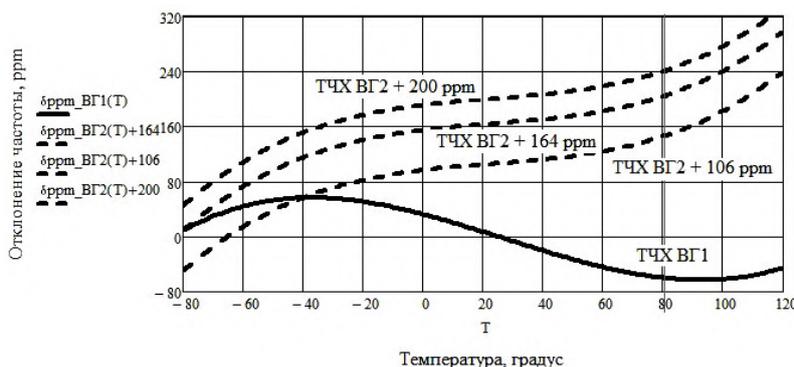


Рис. 5. График ТЧХ ВГ1 (несмещенный), ТЧХ ВГ2 (смещенный)

туре $T = T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура, соответствующая точке перегиба) ВГ1 и ВГ2 генерируют сигналы с одинаковыми рабочими частотами, при перемещении этих сигналов разностная частота $\Delta f = 0$. При температуре $T \neq T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, в результате перемножения сигналов (или одинаковых гармоник частот сигналов) вспомогательных кварцевых генераторов ВГ1 и ВГ2 (рис. 1) образуется сигнал с разностной термозависимой частотой $\Delta f(T)$. Необходимые гармоники частот сигналов ВГ1 и ВГ2 выделяются полосовыми фильтрами ПФ из спектров ВГ1 и ВГ2. ФНЧ подавляет продукты перемножения высоких порядков и пропускает разностную частоту $\Delta f(T)$, которая при необходимости может быть усилена. Определённой температуре соответствует определённое значение частоты $\Delta f(T)$, что может быть использовано в системах термокомпенсации кварцевого генератора.

Для иллюстрации графиков изменения относительной разностной частоты от температуры на рис. 3 выбраны (некоторые из возможно используемых) гармоники частоты сигналов вспомогательных генераторов ВГ1 и ВГ2: или 1-е гармоники, или 5-е гармоники, или 10-е гармоники.

Характеристики зависимости, изображённой на рис. 3, следующие:

1) линейность: коэффициент корреляции Пирсона 0,999 (максимальное значение 1 — наличие полной положительной линейной связи);

2) крутизна полученной зависимости определяется номером используемых при перемножении гармоник сигналов, выделяемых полосовыми фильтрами ПФ из спектра ВГ1 и спектра ВГ2 (рис. 1). Для иллюстрации на рис. 4 графики скорости изменения (крутизны) разностной частоты от температуры — первая производная разности ТЧХ ВГ2 и ТЧХ ВГ1, выбраны некоторые используемые гармоники частоты сигналов ВГ1 и ВГ2: или

1-е, или 2-е, или 3-й, или 5-е, или 7-е, или 10-е гармоники;

3) зависимость имеет неоднозначность (качественную): одному значению разностной частоты соответствуют два значения температуры (за исключением температуры T_0).

Неоднозначность характеристики (например, в диапазоне температур от минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$ до $120 \text{ }^\circ\text{C}$) устраняется смещением значения одной из рабочих частот вспомогательных генераторов на величину

$$\Delta = [(a_{\text{ВГ2}} - a_{\text{ВГ1}})(T - T_0) + (b_{\text{ВГ2}} - b_{\text{ВГ1}})(T - T_0)^2 + (c_{\text{ВГ2}} - c_{\text{ВГ1}})(T - T_0)^3] \cdot 10^6, \quad (2)$$

где $a_{\text{ВГ1}}$ ($a_{\text{ВГ2}}$), $b_{\text{ВГ1}}$ ($b_{\text{ВГ2}}$) и $c_{\text{ВГ1}}$ ($c_{\text{ВГ2}}$) — коэффициенты полиномов, описывающих ТЧХ соответствующих АТ-срезов резонаторов ВГ1 и ВГ2;

T — температура, при которой значения величин названных полиномов равны друг другу (на рис. 5 — это температура минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$ для сплошной линии — это ТЧХ ВГ1, и средней пунктирной линии, обозначенной как «ТЧХ ВГ2 + 164 ppm »).

При этом характеристики выглядят так, как изображено на рис. 5, где средняя пунктирная характеристика смещена для работы датчика от минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$, а нижняя пунктирная — от минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Тот же эффект можно получить смещением значений обеих частот ВГ1 и ВГ2: одной на $+\Delta/2$, другой на $-\Delta/2$ или наоборот.

Полученная смещением однозначная характеристика изображена на рис. 6.

Сплошной график на рис. 6 — устранение неоднозначности для температуры от минус $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше, пунктирный — от минус $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше. При этом необходимый сдвиг ТЧХ ВГ2 составил около 164 ppm и 105 ppm соответственно (тот же эффект достигается при сдвиге обеих частот на половину

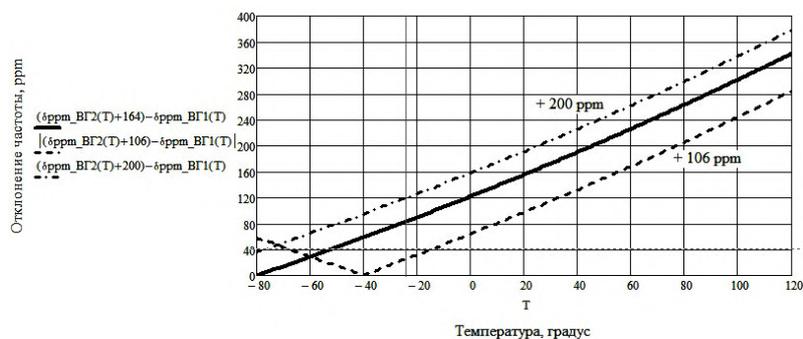


Рис. 6. Изменение относительной разностной частоты сигналов вспомогательных генераторов ВГ1 и ВГ2 от температуры при использовании 1-х гармоник (сплошная линия — смещение ВГ2 на +164 ppm)

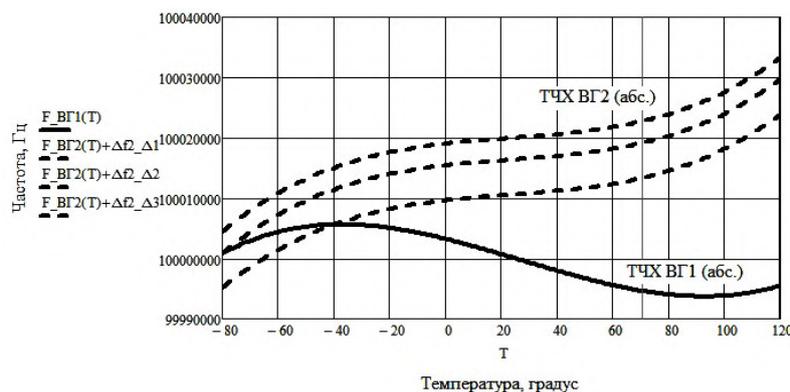


Рис. 7. График ТЧХ ВГ1 и ТЧХ ВГ2 (абсолютные значения частот)

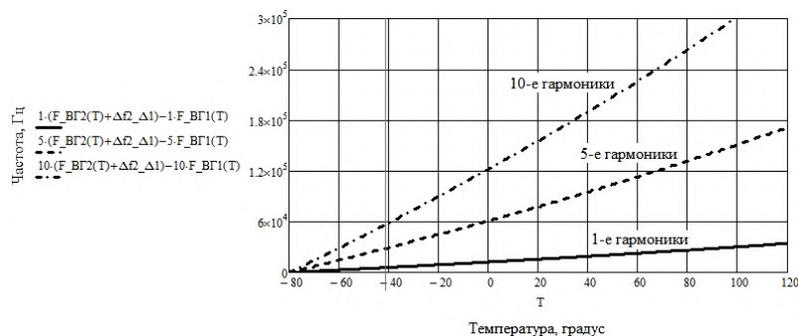


Рис. 8. График изменения разностной частоты

указанных сдвигов, то есть на ± 82 ppm и $\pm 52,5$ ppm соответственно). Также смещение Δ может быть выбрано с таким условием, чтобы при минимальной температуре рабочего диапазона температур значение разностной частоты имело значение более нуля (штрих-пунктирный график при смещении +200 ppm при температуре минус 80 °C имеет значение около 36 ppm) с целью исключения нестабильной работы пороговых устройств (гистерезис триггера Шмидта) и цифровых микросхем, используемых в схеме ЦТККГ. Возможность смещения частоты кварцевых генераторов на величину ± 100 ppm исследовано в [15].

Для иллюстрации абсолютных значений за рабочую частоту ВГ1 и ВГ2 принято 100 МГц при температуре $T_0 = 25$ °C: на рис. 7 изображены график ТЧХ ВГ1 и ТЧХ ВГ2 (при смещении, соответствующем рис. 5) в абсолютных значениях частоты, на рис. 8 — график изменения разностной частоты от изменения температуры при использовании или 1-х, или 5-х, или 10-х гармоник частот сигналов ВГ1 и ВГ2 в абсолютных значениях частоты.

Структурная схема ЦТККГ, использующая термодатчик на основе двух вспомогательных генераторов. Структурная схема ЦТККГ, использующего рассматриваемый ТД, приведена на рис. 9. Предполагается, что все элементы структурной схемы ЦТККГ в равной мере подвергаются действию окружающей эти элементы носителя температуры, и выделяемая при работе схемы тепловая энергия не влияет на ее работоспособность.

При некоторой температуре T (в пределах диапазона рабочих температур) вспомогательные генераторы ВГ1 и ВГ2 генерируют сигналы отличающихся частот $f_{ВГ1}(T)$ и $f_{ВГ2}(T)$. Для достижения максимальной температурной стабильности термокомпенсируемого подстраиваемого генератора (ПГ) целесообразно использовать гармоники частот сигналов вспомогательных генераторов $n \cdot f_{ВГ1}(T)$ и $n \cdot f_{ВГ2}(T)$, фильтруемые полосовыми фильтрами (ПФ) из общего спектра ВГ1 и ВГ2. Сигналы гармоник частот вспомогательных генераторов поступают на перемножитель (смеситель). В результате перемножения частот возникает разностная частота (рис. 9):

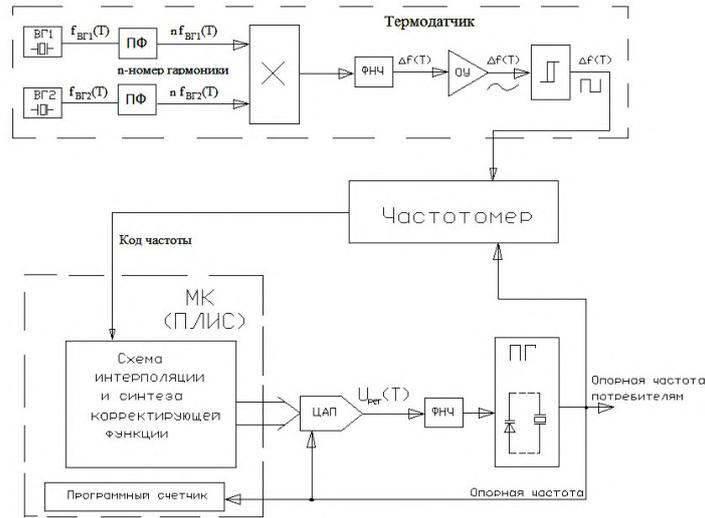


Рис. 9. Структурная схема ЦТККГ

$$\Delta f(T) = |n \cdot f_{BG2}(T) - n \cdot f_{BG1}(T)|. \quad (3)$$

После подавления ФНЧ продуктов смещения частот $n \cdot f_{BG1}(T)$ и $n \cdot f_{BG2}(T)$ разностная частота $\Delta f(T)$, форма напряжения которой является синусоидой, усиливается ОУ и с помощью триггера Шмидта преобразуется в форму цифрового сигнала (меандр). Полученный цифровой сигнал (меандр), имеющий частоту $\Delta f(T)$, подаётся в частотомер, измеряющий частоту посредством счёта числа периодов за известный интервал времени [16]. Результат счёта числа периодов со счётчика — код частоты, подаётся на микроконтроллер МК (или ПЛИС), который на основании кода частоты (соответствующего температуре) осуществляет синтез компенсирующей функции. В соответствии с алгоритмом функционирования МК (или ПЛИС), формирующим компенсирующую функцию, генерируется код для ЦАП, который формирует напряжение управления $U_{уп}(T)$ для подстройки кварцевого генератора (ПГ) с целью термокомпенсации ухода частоты. Необходимые коды в памяти МК формируются калибровкой всего устройства с помощью климатической камеры в реперных точках. Промежуточные значения температуры, которые не были учтены при калибровке, вычисляются интерполированием при выполнении алгоритма синтеза компенсирующей функции. Также в алгоритм синтеза компенсирующей функции возможно включение процедуры адаптивной динамической компенсации уходов частоты кварцевых генераторов в спокойной и неспокойной среде [1].

Калибровкой также достигается нивелирование нелинейности вольт-частотной характеристики подстраиваемого кварцевого генератора (ПГ).

Теоретическая оценка стабильности частоты ПГ. С целью получения теоретической оценки стабильности ПГ в схеме ЦТККГ, при использовании ТД на основе двух вспомогательных генераторов, в последующем анализе применены следующие условия:

1) современные микроконтроллеры (или ПЛИС) и ЦАП позволяют получить точность формирования компенсирующей функции, соответствующую стабильности до 0,01 ppm, при разрешении термодатчика по измерению температуры 0,01 °C [17];

2) диапазон рабочих температур ЦТККГ от минус 40 °C до +85 °C (индустриальный диапазон);

3) используемый метод измерения частоты — счёт числа периодов за известный интервал времени [16]. Метод измерения частоты по периоду повторения [16] не выбран по причине большого значения частоты счётных импульсов (заполняющих период): для достижения стабильности 0,001 ppm необходимая частота счётных импульсов должна быть около 226 МГц;

4) относительная предельная погрешность измерения частоты f_x [16] определяется выражением:

$$\delta_{о.п.} = \delta_{о.п.} + 1/(f_x \cdot T_{изм}), \quad (4)$$

где $\delta_{о.п.} = 10^{-6}$ — предельное значение нестабильности частоты кварцевого генератора, в схеме на рис. 10 это ПГ, опорная частота которого используется для частотомера схемы ЦТККГ (рис. 9). Значение выбрано из распространённых значений метрологических характеристик измерительных частотомеров. В исследуемой модели ЦТККГ предельное значение нестабильности частоты кварцевого генератора, которым является ПГ, имеют значения более стабильные (менее 10^{-6}), которые и имеет целью определить настоящая работа; $T_{изм}$ — время измерения частоты, которое выбрано из [1] для возможности использования адаптивной динамической компенсации уходов частоты кварцевых генераторов в спокойной и неспокойной среде. В [1] приведены зависимости погрешности измерения скорости изменения температуры от времени счёта для спокойной и неспокойной среды, и времена измерений $T_{изм.сп} = 2$ с (для спокойной среды) и $T_{изм.несп.} = 0,2$ с (для неспокойной среды) являются приближёнными значениями минимума названных в настоящем пункте зависимостей;

5) абсолютная погрешность измерения частоты f_x [18] определяется выражением:

$$\Delta_{изм} = \pm \delta_{о.п.} \cdot f_x; \quad (5)$$

6) для получения доверительной вероятности 0,997 одного (следующего) измерения абсолютная погрешность измерения должна быть в три раза меньше допустимого отклонения от измеряемой величины [9]. В реально работающей системе анализируемого ЦТККГ измерения происходят многократно и непрерывно, поэтому доверительная вероятность многократных измерений стремится к 1;

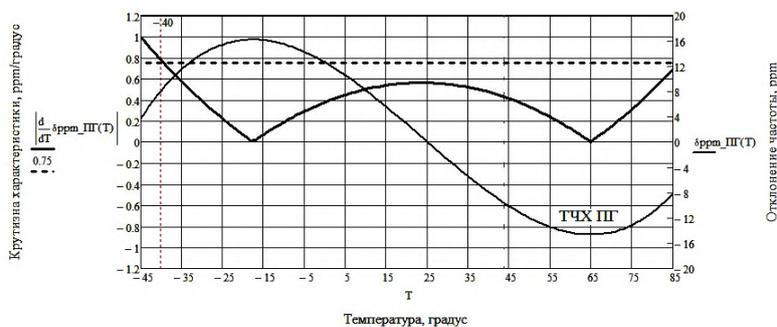


Рис. 10. График первой производной от ТЧХ ПГ — скорость изменения отклонения частоты от изменения температуры; график ТЧХ ПГ

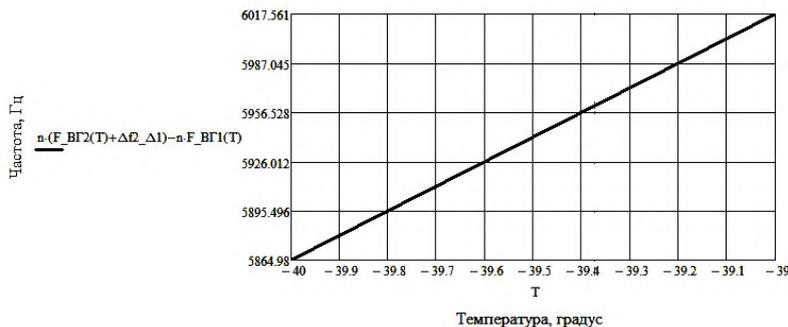


Рис. 11. Изменение разностной частоты (при использовании *первых* гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2) в диапазоне температур от минус 40 °С до минус 39 °С

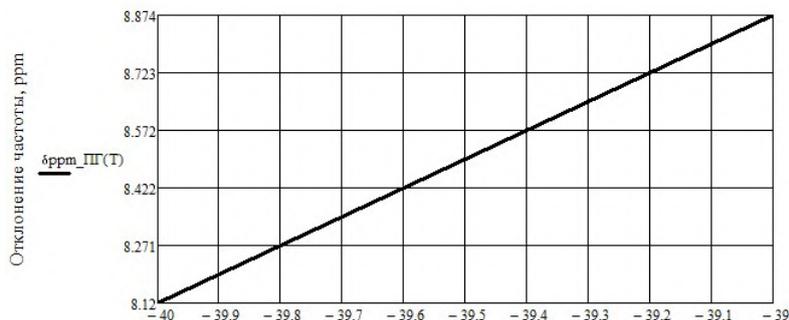


Рис. 12. График отклонения частоты ПГ в диапазоне температур от минус 40 °С до минус 39 °С



Рис. 13. Изменение разностной частоты (при использовании *десятих* гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2) в диапазоне температур от минус 40 °С до минус 39 °С

7) разрядность счётчика частотомера достаточна для счёта импульсов за время измерения $T_{изм}$. Функционирование МК (или ПЛИС) в соответствии с алгоритмом формирования компенсирующей

функции способно обрабатывать код (разрядность) частоты частотомера.

Допущения, при которых дана теоретическая оценка стабильности частоты цифрового термоком-

Характеристики ЦТККГ при использовании первых гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2

Изменение температуры термодатчика	Изменение разностной частоты (рис. 11), Гц	Соответствующее изменение характеристики ТЧХ ПГ (рис. 12), ppm	Относительная предельная погрешность измерения частоты [15]	Абсолютная погрешность измерения частоты [17]	Теоретически достижимая стабильность
1 °С	152 Гц (6017 Гц – 5865 Гц = 152 Гц)	8,87 – 8,12 = 0,75 ppm	Для $T_{\text{полн}} = 0,02^{1)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 0,02 \text{ с}) = 0,00085$	0,00085·5865 Гц = 50,0 Гц (превышает изменение РЧ ²⁾ 152 Гц)	0,75 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,1 °С	15,2 Гц	0,075 ppm	Для $T_{\text{полн}} = T_{\text{полн,ст}} = 0,2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 0,2 \text{ с}) = 0,000085$	0,00085·5865 Гц = 5,0 Гц (превышает изменение РЧ 15,2 Гц)	0,075 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,01 °С	1,52 Гц	0,0075 ppm	Для $T_{\text{полн}} = T_{\text{полн,ст}} = 2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 2 \text{ с}) = 0,0000085$	0,00085·5865 Гц = 0,5 Гц (превышает изменение РЧ 1,52 Гц)	0,0075 ppm (для спокойной среды)
0,001 °С	0,152 Гц	0,00075 ppm	Для $T_{\text{полн}} = T_{\text{полн,ст}} = 2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(5865 \text{ Гц} \cdot 2 \text{ с}) = 0,0000085$	0,00085·5865 Гц = 0,5 Гц (превышает изменение РЧ 0,152 Гц)	стабильность 0,00075 ppm недостижима

Примечания:

- 1) $T_{\text{полн}} = 0,02 \text{ с}$ — (время измерения в 10 крат меньшее $T_{\text{полн,ст}} = 0,2 \text{ с}$) использовано в расчёте, чтобы показать минимальное достаточное время для измерения частоты при достижении стабильности 0,75 ppm (худшей в приведённых вычислениях при использовании 1-х гармоник);
- 2) РЧ — разностная частота.

пенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов:

— в конструкции генератора идеальная тепловая связь между элементами датчика температуры и опорным резонатором генератора с отсутствием градиента температур между ними;

— точно известны значения температурных коэффициентов первого, второго и третьего порядков статических ТЧХ резонаторов, значения коэффициентов динамического поворота ТЧХ, сдвига ТЧХ, времени запаздывания показаний термодатчика.

Очевидно, что максимальная погрешность термокомпенсации («худшая» точка) возникает на участках ТЧХ с максимальной скоростью изменения характеристики от изменения температуры. Взяв первую производную от функции ТЧХ подстраиваемого генератора (рис. 2 ТЧХ ПГ), определили максимальную скорость изменения частоты ПГ при изменении температуры, что составило не более 0,75 ppm (при температуре минус 40 °С) на один градус изменения температуры (рис. 10).

С целью получения максимальной крутизны изменения разностной частоты при изменении температуры целесообразно использовать максимально возможные частоты вспомогательных генераторов. В настоящей статье в расчётах будет использоваться рабочая частота вспомогательных генераторов 100 МГц при температуре T_0 .

Анализируя в совокупности две характеристики:

— характеристику разностной частоты в абсолютном значении (рис. 11) в диапазоне изменения температуры: от минус 40 °С до минус 39 °С, при использовании *первых* гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2;

— характеристику ТЧХ ПГ (практически линейную в диапазоне от минус 40 °С до минус 39 °С, где существует максимальная скорость изменения ТЧХ), изображённую на рис. 12;

— определено соответствие (тождественная пропорция) изменения разностной частоты в абсолютном значении изменению ТЧХ ПГ, что будет соответствовать теоретически достижимой стабильности ЦТККГ (расчёты в табл. 1).

Аналогичный анализ проводится при использовании 10-х гармоник вспомогательных генераторов: анализируются в совокупности две характеристики, изображённые на рис. 12 и 13. Результаты приведены в табл. 2.

Закключение. В статье проведена теоретическая оценка стабильности цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов. Анализ математической модели ТД показал возможность достижения разрешения по измерению температуры 0,001 °С при использовании десятых гармоник частоты сигналов вспомогательных генераторов. Для оценки возможности использования более высоких гармоник вспомогательных генераторов с целью достижения более высокого разрешения по измерению температуры для исследуемой структуры термодатчика необходимо проведение исследования свойств гармоник с номерами 11 и более.

Анализ математической модели схемы ЦТККГ с термодатчиком на основе двух вспомогательных генераторов при указанных выше допущениях показал возможность достижения стабильности:

- 0,075 ppm (для неспокойной среды) и 0,0075 ppm (для спокойной среды) при использовании первых гармоник вспомогательных генераторов;

Таблица 2

Характеристики ЦТККГ при использовании десятых гармоник частоты сигналов ВГ1 и ВГ2

Изменение температуры термодатчика	Изменение разностной частоты (рис. 13), Гц	Соответствующее изменение характеристики ГЧХ ПГ (рис. 12), ppm	Относительная предельная погрешность измерения частоты [15]	Абсолютная погрешность измерения частоты [17]	Теоретически достижимая стабильность
1 °С	1525 Гц (60175 Гц – 58650 Гц = 1525 Гц)	8,87 – 8,12 = 0,75 ppm	Для $T_{\text{ном}} = 0,002^{1)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 0,002 \text{ с}) = 0,0085$	0,0085·58650 Гц = 50 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 1525 Гц)	0,75 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,1 °С	152,5 Гц	0,075 ppm	Для $T_{\text{ном}} = 0,02^{2)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 0,02 \text{ с}) = 0,00085$	0,00085·58650 = 50 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 152,5 Гц)	0,075 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,01 °С	15,25 Гц	0,0075 ppm	Для $T_{\text{ном}} = T_{\text{ном,исп}} = 0,2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 0,2 \text{ с}) = 0,000085$	0,000086·58650 = 5 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 15,25 Гц)	0,0075 ppm (для неспокойной и спокойной среды)
0,001 °С	1,525 Гц	0,00075 ppm	Для $T_{\text{ном}} = T_{\text{ном,исп}} = 2 \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 2 \text{ с}) = 0,0000095$	0,000095·58650 = 0,56 Гц (не превышает ³⁾ изменение РЧ 1,525 Гц)	0,00075 ³⁾ ppm (для спокойной среды)
				Для $T_{\text{ном}} = 2,3^{4)} \text{ с}$: $10^{-6} + 1/(58650 \text{ Гц} \cdot 2,3 \text{ с}) = 0,0000084$	0,000084·58650 = 0,49 Гц (троекратно не превышает изменение РЧ 1,525 Гц)

Примечания:

- 1) $T_{\text{ном}} = 0,002 \text{ с}$ — (время измерения в 100 крат меньше $T_{\text{ном,исп.}} = 0,2 \text{ с}$) использовано в расчёте, чтобы показать минимальное достаточное время для измерения частоты при достижении стабильности 0,75 ppm (худшей в приведённых вычислениях при использовании 10-й гармоники);
- 2) $T_{\text{ном}} = 0,02 \text{ с}$ — (время измерения в 10 крат меньше $T_{\text{ном,исп.}} = 0,2 \text{ с}$) использовано в расчёте, чтобы показать минимальное достаточное время для измерения частоты при достижении стабильности 0,075 ppm;
- 3) абсолютная погрешность измерения частоты 0,56 Гц троекратно превышает изменение разностной частоты $0,56 \cdot 3 = 1,68 > 1,525 \text{ Гц}$, при этом доверительная вероятность измерения составит не 0,997, а несколько меньшую. В реально работающей системе предложенного ТККГ измерения происходят многократно и непрерывно, поэтому доверительная вероятность многократных измерений стремится к 1;
- 4) $T_{\text{ном}} = 2,3 \text{ с}$ — (превышает $T_{\text{ном,исп}} = 2 \text{ с}$), при котором абсолютная погрешность измерения частоты 0,49 Гц троекратно не превышает изменение разностной частоты $0,49 \cdot 3 = 1,47 < 1,525 \text{ Гц}$.

— 0,0075 ppm (для неспокойной среды) и 0,00075 ppm (для спокойной среды) при использовании десятых гармоник вспомогательных генераторов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». Соглашение о предоставлении субсидии № 075-02-2024-1533.

Библиографический список

1. Косых А. В. Адаптивная динамическая температурная компенсация уходов частоты кварцевых генераторов // Омский научный вестник. 2008. № 1 (64). С. 163–169. EDN: JVZMQL.
2. Deng X., Wang Sh., Jing Sh. [et al.]. Dynamic Frequency – Temperature Characteristic Modeling for Quartz Crystal Resonator Based on Improved Echo State Network // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2022. Vol. 69 (1). P. 438–446. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3118929.
3. Abramson I. Two-mode quartz resonator for digital temperature compensated quartz oscillators // Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium. 1992. P. 443–447. DOI: 10.1109/FREQ.1992.269982.
4. Benjaminson A., Stalling S. A microcomputer compensated crystal oscillator using a dual-mode resonator // Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control. 1989. P. 20–26. DOI: 10.1109/FREQ.1989.68854.
5. Watanabe Y., Sekimoto H., Goka S. [et al.]. A dual mode oscillator based on narrow-band crystal oscillators with resonator filters // Proceedings of International Frequency Control Symposium. 1997. P. 365–372. DOI: 10.1109/FREQ.1997.639211.
6. Kusters J. A., Leach J. G., Ficher M. S. Quartz resonator cut to compensate for static and dynamic thermal transient. US patent 4079280; filed June 2nd, 1976; published March 14th, 1978.
7. Гослинг В. Цифровой метод компенсации температурной нестабильности кварцевых генераторов // Электроника. 1978. № 19. С. 16–17.
8. Kaoru K., Yoshiaki M., Tsukasa K. [et al.]. High-Performance DSP-TCXO Using Twin-Crystal Oscillator // 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS). 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/FCS.2014.6859849.
9. ГОСТ 21655-87. Каналы и тракты магистральной первичной сети единой автоматизированной системы связи. Электрические параметры и методы измерений. Введ. 01–01–1989. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 106 с.
10. Чистяков А. Н. Цифровая термокомпенсация кварцевых генераторов // Радиотехника. 1983. № 7. С. 54–56.
11. Hayashi K., Yokozeki Y., Kunitomo H. The High Short-Term Frequency Stability Digitally Controlled X'tal Oscillator

with Small Size and Low Power Consumption // 2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS57587.2023.10272093.

12. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
13. Андросова В. Г., Банков В. Н., Дикиджи А. Н. [и др.]. Справочник по кварцевым резонаторам / под ред. П. Г. Поздныкова. Москва: Связь, 1978. 288 с.
14. Хоменко И. В., Косых А. В. Кварцевые резонаторы и генераторы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. 157 с. ISBN 978-5-8149-2583-1.
15. Peng F., Huang X., Li Y. [et al.]. Realization of Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator with Single Varactor // 2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/IFCS.2018.8597501.
16. Дворяшин Б. В. Метрология и радиоизмерения. Москва: Издат. центр Академия, 2005. 304 с.
17. Косых А. В. Кварцевые генераторы с цифровой термокомпенсацией: проблемы и перспективы реализации // Омский научный вестник. 2006. № 1 (34). С. 121–125. EDN: HTSJNN.
18. Артемьев Б. Г., Голубев С. М. Справочное пособие для работников метрологических служб. В 2 кн. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Изд-во стандартов, 1990. Кн. 1. С. 1–428.

КУЛЯСОВ Сергей Михайлович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

Адрес для переписки: uchenik_11585@mail.ru

ЧЕТТЕР Денис Михайлович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: dmchetter@omgtu.ru

ЛЯШУК Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1635-6235

AuthorID (РИНЦ): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Адрес для переписки: pribor78@mail.ru

Для цитирования

Кулясов С. М., Четтер Д. М., Ляшук А. Н. Теоретическая оценка стабильности частоты сигнала цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора с термодатчиком на основе двух вспомогательных кварцевых генераторов // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 139–149. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-139-149.

Статья поступила в редакцию 16.06.2024 г.

© С. М. Кулясов, Д. М. Четтер, А. Н. Ляшук

THEORETICAL ASSESSMENT OF THE STABILITY OF A DIGITAL THERMOCOMPENSATED QUARTZ OSCILLATOR WITH TEMPERATURE SENSOR BASED ON TWO AUXILIARY QUARTZ OSCILLATORS

The article provides a theoretical limit assessment of the stability of a digital thermocompensated quartz oscillator with a temperature sensor based on two auxiliary quartz oscillators. The results are 7,5 ppb (for a restless environment) and 0,75 ppb (for a calm environment). Technical solutions are considered for obtaining a linear one-to-one dependence of the difference frequency value on temperature and increasing the steepness of this dependence. The proposed solutions allow obtaining a temperature measurement resolution of up to 0,001 °C.

Keywords: temperature sensor, quartz oscillator, thermocompensation, temperature stability, calm environment, restless environment.

Acknowledgments

The work is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the federal project «Training of Personnel and Scientific Foundation for Electronic Industry» of the Russian Federation State Programme «Scientific and Technological Development of the Russian Federation». Subsidy Agreement No. 075-02-2024-1533.

References

1. Kosykh A. V. Adaptivnaya dinamicheskaya temperaturnaya kompensatsiya ukhodov chastoty kvartsevykh generatorov [Adaptive dynamic temperature compensation of crystal oscillators frequency shifts] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2008. No. 1 (64). P. 163–169. EDN: JVZMQL. (In Russ.).
2. Deng X., Wang Sh., Jing Sh. [et al.]. Dynamic Frequency – Temperature Characteristic Modeling for Quartz Crystal Resonator Based on Improved Echo State Network // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2022. Vol. 69 (1). P. 438–446. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3118929. (In Engl.).
3. Abramson I. Two-mode quartz resonator for digital temperature compensated quartz oscillators // *Proceedings of the 1992 IEEE Frequency Control Symposium*. 1992. P. 443–447. DOI: 10.1109/FREQ.1992.269982. (In Engl.).
4. Benjaminson A., Stalling S. A microcomputer compensated crystal oscillator using a dual-mode resonator // *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*. 1989. P. 20–26. DOI: 10.1109/FREQ.1989.68854. (In Engl.).
5. Watanabe Y., Sekimoto H., Goka S. [et al.]. A dual mode oscillator based on narrow-band crystal oscillators with resonator filters // *Proceedings of International Frequency Control*

Symposium. 1997. P. 365–372. DOI: 10.1109/FREQ.1997.639211. (In Engl.).

6. Kusters J. A., Leach J. G., Ficher M. S. Quartz resonator cut to compensate for static and dynamic thermal transient. US patent 4079280; filed June 2nd, 1976; published March 14th, 1978. (In Engl.).

7. Gosling W. Tsifrovoy metod kompensatsii temperaturnoy nestabil'nosti kvartsevykh generatorov [Digital method for compensation of temperature instability of quartz oscillators] // *Elektronika. Elektronika*. 1978. No. 19. P. 16–17. (In Russ.).

8. Kaoru K., Yoshiaki M., Tsukasa K. [et al.]. High-Performance DSP-TCXO Using Twin-Crystal Oscillator // *2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS)*. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/FCS.2014.6859849. (In Engl.).

9. GOST 21655-87. Kanaly i trakty magistral'noy pervichnoy seti edinoy avtomatizirovannoy sistemy svyazi. Elektricheskie parametry i metody izmereniy [Channels and links of primary trunk network within all-union automatic communication system. Electric parameters and methods of measurement]. Moscow, 1988. 106 p. (In Russ.).

10. Chistyakov A. N. Tsifrovaya termocompensatsiya kvartsevykh generatorov [Digital thermal compensation of quartz oscillators] // *Radiotekhnika. Radiotekhnika*. 1983. No. 7. P. 54–56. (In Russ.).

11. Hayashi K., Yokozeki Y., Kunitomo H. The High Short-Term Frequency Stability Digitally Controlled X'tal Oscillator with Small Size and Low Power Consumption // *2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*. 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS57587.2023.10272093. (In Engl.).

12. Malov V. V. P'yezorezonansnyye datchiki [Piezoresonance sensors]. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow, 1989. 272 p. (In Russ.).

13. Androsova V. G., Bankov V. N., Dikidzhi A. N. [et al.]. Spravochnik po kvartsevym rezonatoram [Handbook of quartz resonators]. Moscow, 1978. 288 p. (In Russ.).

14. Khomenko I. V., Kosykh A. V. Kvartsevyye rezonatory i generatory [Quartz resonators and oscillators]. Omsk, 2018. 157 p. ISBN 978-5-8149-2583-1. (In Russ.)

15. Peng F., Huang X., Li Y. [et al.]. Realization of Voltage Controlled Temperature Compensated Crystal Oscillator with Single Varactor // 2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). 2018. P. 1 – 3. DOI: 10.1109/IFCS.2018.8597501. (In Engl.).

16. Dvoryashin B. V. Metrologiya i radioizmereniya [Metrology and radio measurements]. Moscow, 2005. 304 p. (In Russ.).

17. Kosykh A. V. Kvartsevyye generatory s tsifrovoy termokompensatsiyey: problemy i perspektivy realizatsii [Quartz generators with digital thermo-compensation: problems and implementation trends] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2006. No. 1 (34). P. 121 – 125. EDN: HTSJNN. (In Russ.).

18. Artem'yev B. G., Golubev S. M. Spravochnoye posobiye dlya rabotnikov metrologicheskikh sluzhb. V 2 kn. [Metrology Handbook. In 2 bks.]. 3rd ed., revised and supplemented. Moscow, 1990. Bk. 1. P. 1 – 428. (In Russ.).

KULYASOV Sergey Mikhailovich, Graduate Student of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems

Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

Correspondence address: ychenik_11585@mail.ru

CHETTER Denis Mikhailovich, Graduate Student of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: dmchetter@omgtu.ru

LYASHUK Aleksey Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1635-6235

AuthorID (RSCI): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016

Correspondence address: pribor78@mail.ru

For citations

Kulyasov S. M., Chetter D. M., Lyashuk A. N. Theoretical assessment of the stability of a digital thermocompensated quartz oscillator with temperature sensor based on two auxiliary quartz oscillators // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 139 – 149. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-139-149.

Received June 16, 2024.

© S. M. Kulyasov, D. M. Chetter, A. N. Lyashuk

PROMISING SYSTEMS FOR CONTROLLING PROSTHETICS: A REVIEW

People with disabilities in the enormous scientific-technological revolution hope that it will overshadow the provision of assistance and find suitable solutions for them to lead their normal lives. The intersection of sciences among themselves took into account the problem of physical disabilities and, in particular, the loss of both upper and lower limbs. Modern prostheses are the product of the intersection of science and the technological revolution, which are still in the ladders of modernity and development due to they contain operators that can be controlled by brain signals according to the principle of neurainterfaces. Neuroimaging techniques such as electromyography, functional infrared spectroscopy and electroencephalography are the superior methods of controlling these modern prostheses can be modelled on two functions, namely independent work and hybrid work. In light of these data the article takes upon itself these systems in their individual and hybrid states. In addition, this article indicates which of these techniques is the most worthy in creating the preferred system. The scope of the research methodology limited to neuroimaging techniques towards scenarios of neurological rehabilitation and restoration of lost functions. The review has three axes. The first axis collects, summarizes and evaluates information from relevant studies published over the last decade. The second axis presents important results from previous experimental results in this field in relation to current research. This study was systematically conducted to provide a rich image and evidence-based evidence of prosthetic control techniques to all experts and scientists. The third axis is to identify a wide area of knowledge that requires further investigation, and follow-up the succession of scientific events of these systems towards the possibility of integration among themselves to create the most promising system for controlling prostheses.

Keywords: disability, electroencephalography, electromyography, functional near infrared spectroscopy, hybrid brain-computer interface, control system, operators, prostheses.

Introduction

Our concrete world, which has become inflamed by wars with modern and deadly lethal weapons, indicates that disabilities are constantly increasing and significantly. In order to diagnose the focus of the research we take in consideration the disabilities that can be seen in the upper limbs are present in five essential regions [1]:

1. Wrist amputation.
2. Forearm amputation.
3. Shoulder amputation.
4. Shoulder joint amputation.
5. Forequarter amputation.

Disability or loss of a body part is a difficult psychological blow to a person, which causes anxiety, stress and depression, has a strong impact on a person's personality and may even lead to suicidal thoughts. In order to put the disability of the limbs, in particular, the upper limbs, as a research problem, it is necessary to work on finding alternatives using concerted efforts and cooperation and taking advantage of the accelerated technological progress to improve the lives of the missing limbs.

Previously, the prosthesis served only a cosmetic purpose, and after technological progress entered, the

prosthesis was blended to be a hybrid between aesthetic and functional performance. To control the functional performance, it is necessary to control the triggers of the prosthesis. Modern neural interfaces play the role of controlling these operators that — neural interfaces — based on the real-time detection of patterns of motor activity of the brain using neuroimaging techniques on the one hand and the transformation of the information obtained into commands for controlling the example of a prosthesis on the other [2, 3].

Brain — computer interfaces (BCIs) can be defined as neural interfaces that keep pace with modern technical development, which are innovative in measuring brain activity and transferring commands to a computer or an external device, and they are based on controlling machines and other devices using only what the operators think (using only their thoughts). BCIs in terms of operation, there are two different systems, namely

— unidirectional its action is limited to either receiving signals from the brain or sending signals to the brain;

— bidirectional allowing the exchange of information in both directions, thereby controlling external devices [4].

It should also be noted that neural interfaces can be classified depending on the nature of the work, whereas recent studies have proven the possibility of forming another system of neural interfaces called hybrid brain-computer interface systems, which abbreviated as hybrid brain-computer interfaces (HBCIs). In terms of data processing the work of HBCIs is extends to hybrid double and triple data processing and is not limited to single data processing [5], [6–8]. Neuroimaging methods can be based on BCIs or HBCIs. Currently, the most prominent and popular methods for controlling neuroprostheses neurorehabilitation are electroencephalography (EEG) [9, 10], functional near infrared spectroscopy (fNIRS) [11, 12], and electromyography (EMG) [13, 14].

As documented by recent experimental studies, the most common methods are (EEG, fNIRS and EMG), which are of great interest in the fields of prosthetics. It should be noted that these methods (when used independently) cannot form an integrated system and this is due to several inherent disadvantages. However, what distinguishes these methods is that they can be one that can fill the shortcomings of the other with which they share in the composition of the hybrid system. On the related hand, the fNIRS technique is one of the most important ways to form a hybrid system, as it does not depend on muscle activity. The absence of muscle activity or muscle lethargy, or their inability to cause a deficiency in EEG and EMG techniques.

Similar, the article sheds light on adored technologies in the control framework on external devices and diagnoses their superiority and non-superiority towards HBCs based on the most important studies that have dealt with these technologies whether used in the individual state or in their hybrid state. In addition, this article encourages those interested in scientific research related to prosthetic control systems, exoskeletons and in general devices that can be controlled through the biological imagination. The product of scientific progress of medical devices overshadowed the improvement and management of prostheses in terms of aesthetics and functionality [15]. Thus, the classification of human-machine interaction strategies is influenced by recorded brain signals that are well-known tools for studying brain functions and which are in the depth of the growing scientific research axes. In turn, neuroimaging techniques that come into significant contact with prosthetics have emerged.

EEG is one of the first neuroimaging techniques proposed and mastered. It is used to record physiological signals during brain activation to represent hand movements as a procedure for controlling prostheses particularly, the upper limbs [16]. Electromyography (EMG) is another pioneering technique using electromyography for controlling external devices [17] and neurorehabilitation [18]. fNIRS is a powerful tool for studying brain activity, more widely used in current research and in various fields [3]. Despite the relative successes achieved by the above techniques, they cannot be considered as promising and ideal ways to control prosthetic limbs due to the drawbacks associated with them. Similarly, this review deals with future perspectives that strengthen the concepts of finding a promising prosthetic control system.

Scope of research methodology strategy

The ultimate goal of this review is to analyze and compare the systems and research studies in the field of prosthetics in order to consolidate the idea of finding an integrated and promising control system

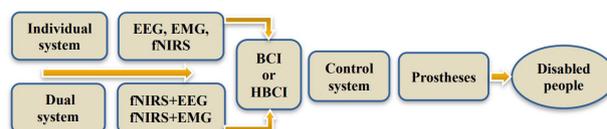


Fig. 1. Research methodology for the most common systems for prosthetic scenarios

for the prosthesis. The methods varied from databases such as Google Scholar, eLIBRARY, Scopus and various websites such as <https://www.refseek.com>, <https://www.base-search.net> and others. The scope of the research strategy and methodology involved hundreds of up-to-date sources for 95 % (2020–2024) and was reduced to 67 sources.

The sequence of searching for technical systems, both individual and combined, up to the control system of the prosthesis can be indicated in Fig. 1.

Conclusion the research methodology focused on the topics of the article and its keywords, the recommendations of experienced researchers and the usefulness of their observations, and then added or deleted them to reach the target purpose.

Hybrid brain-computer interface (HBCI)

The concept of BCI is related to the fact of recognition of data in real time and this is considered an essential requirement for controlling the prosthesis. BCI is located at an interdisciplinary concept as it includes engineering, computer science, biology and physics but its development is closely and really related to physics. Spontaneous physiological processes or processes resulting from external stimulation lead to the classification of brain states according to its recorded activity in real time using an intelligent BCI system. The reception of signals from the brain, sending them to it, or allowing the exchange of information carried by these signals in both directions depends on the work of HBCI [19], and can be classified as the following [3, 4]:

BCI based on the control command. The neural interfaces are classified based on the active-reactive and passive mode or they may be dual-mode and this depends on the control commands provided by BCI operator.

BCI based on the way the input data are processed. Synchronous and asynchronous this depends on the input processing method.

BCI based on invasive and non-invasive BCI and brain-machine interfaces. Electrophysiological recordings may be classified as non-invasive or invasive, but it is the most promising system for controlling prostheses based on non-invasive (the purpose of the current article).

HBCI includes single data processing, or extends to double and triple data processing and this is what makes it a hybrid system [20, 21–23]. According to the principles of operations that may be related to electrical activity, chemical processes of the brain or others, one of the highest goals of HBCI is to control prostheses or external devices in general using brain electrical activity in the form of EEG [24] or chemical activity in the form of fNIRS [25, 26], when used alone or in combination [27]. A large percentage of PSI systems use only one type of physiological signal, whereas fNIRS method is able to take advantage of different methods and thus can combine active and passive neural interfaces.

Active and passive HBCI systems are more efficient, allow assessing the mental state of the human or

animal and take benefit of various systems such as fNIRS and EEG [24, 28, 29] as well as EEG-EMG hybrid technologies [30, 31]. In the context of hybridisation systems HBCI can be of three types according to different brain activity signals:

I. HBCI when using various signals of reflex brain activity.

II. HBCI when using signals of brain activity mixed with external signals of a different nature.

III. HBCI when using various physiological brain activities simultaneously is synchronized with the recording technology.

The performance of hybrid BCI provides a higher rating accuracy than individual BCI. Therefore, one of the fundamental reasons for not adopting HBCI on a large scale in the bulky and complex equipment. To decipher this complexity, lightweight and compact HBCI needs to be implemented with caution to reduce performance degradation. In this line of research studies have shown that the use of HBCI with only two EEG channels and two pairs of fNIRS (detectors sources) can achieve high accuracy while the system is easy to use [32].

The most common systems in prosthetics scenarios In its independent state

EEG

EEG is a non-invasive method that depends on the nervous system by stimulating its electrical activity, and the information recorded by EEG and obtained between the brain and the device as a result of electrical activity is still low. EEG has proven itself in several areas, particularly in clinical applications [9, 10, 33], but due to highly sensitive to artifacts and noise, which makes it unsuitable as a control system for prostheses when it is in its independent state [16]. However, experimental studies have recently been conducted to design and implement a prototype artificial lower limb controlled by brain signals recorded by EEG [34].

Advantages:

- Low cost.
- Portable, non-invasive and easy to use.
- Can provide high temporal resolution of brain activity.

Disadvantages:

- Low spatial resolution due to wide distribution of electrodes on the scalp.
- Susceptible to artefacts associated with eye movements, muscle contractions, etc.

EMG

EMG is a diagnostic method that works according to the principle of skeletal muscle activity to record vital signals resulting from muscle activity. When its work is limited to measuring the electromyography of the surface muscles resulting from the muscular structure, it is called surface electromyography and is denoted by the symbol (sEMG). The measurement can be achieved either invasively or superficially (non-invasively), at the level of a single muscle fiber, a single motor unit or the entire muscle. EMG information processing permits diagnosing musculoskeletal and neuromuscular disorders and analyzing or using simg for rehabilitation or robot control [14, 35].

Advantages:

- Extremely high temporal resolution.
- Excellent source localization capabilities.

Disadvantages:

- Requires expensive equipment to be set up and operate.
- Requires highly trained personnel for proper calibration and signal processing.



Fig. 2. Simplicity of the work, showing a subject performing experimental tasks in a laboratory at Belgorod State University in Russia in pursuit of finding a control system for prostheses

c. Susceptible to environmental interference, such as electromagnetic fields generated by nearby electronics, which can distort readings if not properly shielded from these sources before taking measurements.

fNIRS

fNIRS is a non-invasive (neuroimaging methods for BCIs) optical imaging technique that typically uses two or more different wavelengths to measure changes in the concentration of oxygenated hemoglobin (oxyHb) and deoxygenated hamoglobin (deoxyHb) (650 – 1000 nm). However, several aspects that probably make fNIRS more useful for evaluation in conjunction with EEG, sEMG, functional magnetic resonance and positron emission tomography include its usefulness depended on usability as well as indicators that oxygen saturation of brain capillaries observed with fNIRS mostly reflects neuron activity [36, 37]. fNIRS can only be measured in areas close to the surface of the cortex and can also be referred to as optical topography (OT) and sometimes simply as NIRS (Fig. 2).

In addition, several experiments utilizing fNIRS for prosthesis control have been relatively successful [1, 12].

Advantages:

- Portable and low cost compared with other BCI technologies.
- Highly sensitive and capable of detecting changes in oxygenated blood levels at different depths of brain tissue with good accuracy when properly calibrated.

Disadvantages:

- Lower temporal resolution than EEG or MEG systems due to their reliance on haemodynamic responses rather than electrical signals directly from neurons.
- Not suitable for measuring deep brain structures because it depends on the transmission of light through the skull, which is known for the hardness of its bones, which leads to obstruction of light in thick skulls or dense skeletons, as in the elderly or under 5 years of age in children.

Results of previous studies of the system in its individual state that used the most common classifiers, such as, Support Vector Machine (SVM), K Nearest Neighbor (KNN), linear discriminant analysis (LDA) and others are shown in Table 1.

Hybrid state of fNIRS + EEG

The basic idea of creating any hybrid system, be it technical or software, is that one of the two systems should be complementary to the shortcomings of the other, so that the output of the hybrid system should provide results that are superior to those of the stand-

Classification accuracy results for systems (independent usage)

Reference and publication year	Independent system	Method	Accuracy
[38], 2021	EEG	End-to-end shallow architecture	83,20 %
[39], 2022	EEG	Multiple built-in transfer training	83,14 %
[2], 2021	fNIRS	NN_LSTM, NN_ConvLST, NN_ResNet	91 %
[40], 2020	fNIRS	Linear discriminant analysis, support vector machine and k nearest neighbor	90,54 %
[41], 2017	EMG	SVM, LDA	72,2 %
[35], 2023	sEMG	CNN-LSTM	70 % : 30 %

Table 2

Classification accuracy results for systems (hybrid usage)

Reference and publication year	Hybrid state of system	Method	Accuracy or average value of accuracy
[56], 2022	EEG + fNIRS	Vector-phase analysis	82, 89, 87, 86 %
[57], 2022	EEG + fNIRS	fNIRS-driven attention network (FGANet)	78,59 % ± 8,86
[45], 2023	EEG + fNIRS	FBCSP + PCA + SVM, GLM + MBLL	92,25 % ± 4,99
[41], 2017	sEMG + fNIRS	SVM, LDA	86,4 %
[58], 2021	sEMG + fNIRS	LDA	96,4 % and 94,1 %
[59], 2020	sEMG + fNIRS	LDA	78–81 %

alone system. On the other hand, it should be that two candidate systems for the formation of the hybrid state are similar in some characteristics with the possibility of compensating for their shortcomings with each other.

As mentioned above, fNIRS technology is the technology that conforms to this vision, it can be considered as a complementary tool to fill the shortcomings of the common technology. Thus, the possibility of creating a hybrid system of fNIRS + EEG is possible to obtain, since the results obtained with these systems are better than those obtained when used independently (Table 1, 2).

In EEG, sensor-electrodes are located on the skin of the upper part of the skull (according to international «10–20» system) and pick up electrical signals from neurons in the brain. This leads to the fact that the electroencephalography of the brain can be measured and at once allows monitoring complex nervous activity as well as tracking its continuous changes [3]. EEG is also positive in some characteristics as well as it is negative in some characteristics, for example, it is non-invasive, provide high temporal resolution and allowing real-time measurement of motor imagery in its positive sense [42], while it is very sensitive to noise in its negative sense, and this is what makes it under study and to say a complementary tool, and fNIRS may be an alternative to it for some functions or these two technologies may have a unified system that complements each other.

In contrast to fNIRS, which suffers from a time delay of 3–5 seconds in detecting regions of brain activity. It has also been extensively reported that better BCI performance can be performed by using multimodal analyses instead of offline EEG signals. For this,

numerous studies evaluating both the electrical activity of the brain and the activity of the circulatory system attracted considerable attention [43, 44]. Furthermore, recent scientific studies based on the analysis of activated brain regions using fNIRS proved that the accessory motor cortex was obviously activated during motor imagery, which leads that hybrid signals with hybridisation strategy can improve stability and error neglect in BCI systems, this makes it a valuable way for practical applications [45].

The accuracy of classification and the rate of information transfer by the method of the combination of EEG-fNIRS due to their complementary characteristics are from the widespread indicators in our current time [22]. The combination of these technologies has certain unique characteristics because the basis of merge them is their dependence on a physiological phenomenon called neurovascular coupling in the brain, which makes them more useful in certain applications. The system of the two technologies is promising for prosthetic control [46]. Therefore, in the foreseeable near future, a possible alternative to EEG for recording brain activity in a mobile handheld BCI can be considered as fNIRS technology or a form of hybrid EEG-fNIRS method.

Hybrid state of fNIRS + EMG

EMG information processing enables the diagnosis of muscle and neuromuscular disorders, as well as analyze or use sEMG in various fields for example robot control, rehabilitation and others [47, 48]. Their frequency ranges vary from 0,01 Hz to 10 kHz and this certainly depends on the type of study carried out by EMG. According to recent studies, frequencies between 50–15 Hz are the most useful [49]. Whereas

with fNIRS, the frequency is approximately 1 Hz at optimal wavelength 830 nm [3, 50]. At the same study, sEMG and fNIRS can be used together or used independently, but when they are used together the dual system excels.

In the field of motor activity, several studies carried out through the techniques of fNIRS and EMG have shown that there is no relationship to the signals obtained during dynamic movements when performing sports exercises, in addition, even the methods of signal analysis cannot be described. In [51], found that it is possible to perform simultaneous measurements of EMG, mechanomyography (MMG) and near-infrared spectroscopy (NIRS) at a local position using a multi-layered wireless sensor that can be used to predict muscle fatigue. In the dynamics of running on a treadmill and strength exercises a recently developed integrated quadriceps oximetry system was implemented in which regional muscle oxyhemoglobin saturation and sEMG data were measured [52].

Positive correlations were found between the EMG signals and the fners during the recording of oxygen consumption and muscular activity of the left calf muscle among the participants, where the signal correlations are with the most active and least active lifestyles [53]. This leads to a correlation during dynamic movements in the signals of EMG and fNIRS during exercise.

The existence of these associations, which can be described as positive and important, is a clear guide towards the formation of a hybrid system, which is what this article seeks and this quest is extended to further laboratory studies in order to investigate the relationship between brain activity and the performance of motor tasks and can be targeted for clinical trials.

In the operation of the EMG system alone, improvement in control performance requires the addition of more EMG sensor nodes, but this method is immaterial and impractical for people with limb disability due to atrophy or insufficiency of the remaining muscles [54]. Additionally, prostheses should be lightweight, but the improvement in control performance is offset by complexity, excess weight and a more expensive price when adding sensory nodes, whereas in the philosophy of prosthetics control interfaces should be very perfect, limited sensory channels and computational complexity [55]. Results of previous studies of systems in their hybrid state that used the most common methods and classifiers are shown in Table 2.

Hardware, software and algorithms used for signal processing

When the brain is activated by any of the triggers, the signal reception stage begins. The acquired signal is impure mixed with noise, artifacts and other effects, therefore, the acquired signal goes through different stages and here the role of artificial intelligence represented by neural networks enters towards filtering, analysis and classification up to the stage of real-world application. All triggers of the motor cortex with different commands cause a change in hemoglobin concentration based on the stimulus that triggered brain activity. The triggers to activate the motor cortex should be motor triggers. What we would like to point out is that the signal dynamics obtained using hybrid systems concepts go through the same steps as the signal dynamics obtained using independent systems concepts, as shown in Fig. 3.

A modern (software and hardware-based BCI) is a system based on artificial intelligence that can process

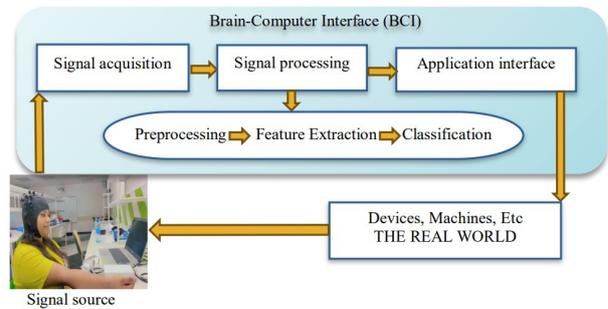


Fig. 3. Dynamic stages of the signal

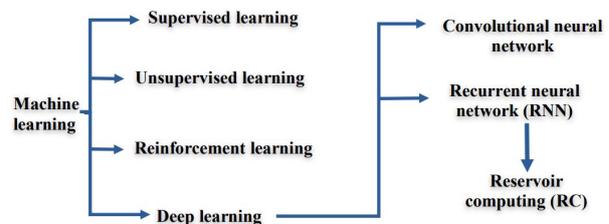


Fig. 4. Basics of machine learning in its four strategies

brain activity in real time and recognise a certain finite set of central nervous system activity patterns [2].

One of the current and promising approaches to analysing neurophysiological signals is machine learning are machine learning (ML) and reservoir computing (RC). Machine learning approaches have traditionally fallen into four broad categories, depending on the nature of the input data and the learning strategy shown in Fig. 4.

These methods involve analyzing data without prior knowledge of the data source, i.e., data not associated with the model. In other words, the underlying mathematical model (or dynamical system) that generates the time series is unknown. At the same time, machine learning can build this model from sampled data, known as 'training data'. Thus, these methods, trained on a reasonable and representative amount of training data, can perform various tasks (classification, detection, prediction) based on the newly acquired data [3].

The challenges can exist at any stage of the signal, feature extraction is also not without challenges because it depends heavily on previous complex knowledge over time, and this leads to the risk of losing the information that the biological signal carries [60, 61]. Feature extraction methods vary from one technique to another, some pass through multiple stages, such as EEG, where brain signals can be filtered in three bands, and some are limited to one stage, such as fNIRS, where brain signals can be filtered in one band to improve signal quality for later analysis [45, 62].

Apparently the language of hybridisation is not limited to technology, but this can also extend to signal program stages. In [43], a combination consisting of wavelength range decomposition with canonical correlation analysis to correct for motion artifact of single channel EEG and fNIRS signals performed better than using wavelength range decomposition independently.

The performance preference of single-method and mixed methods using the conventional whole optimization algorithm the classification accuracy was equal to 90,37; 7,66 % and binary improved whale

optimization algorithm showed high classification accuracy equal to 94,22; 5,39 % which means that the classification performance increased by 3,85 % compared to the traditional whale optimization algorithm [63].

Discussion

Perhaps the most prominent systems in the fields of scientific research and the most common towards the transformation of mental commands into movement are EEG, EMG and fNIRS. These technologies with their individual uses face a clear deficit in the formation of a comprehensive system but these systems can be combined to create an integrated control system. For example, both EEG, EMG rely on muscle activity, whereas muscle activity may not be available if the muscle is damaged or lost [64, 65].

The fNIRS technique is based on chemical processes (blood oxygen level independent (BOLD)). That means measuring the concentrations of hemoglobin and deoxyhemoglobin in the sense that they do not depend on muscle activity and therefore can share their positive characteristics to compensate for the negative characteristics in the EEG technique or the EMG technique.

After a detailed breakdown of the advantages and disadvantages of the above methods by comparing the results of the technologies found that the hybrid prosthetic management system produced more accurate results than each system individually [66]. The most likely advantage of the hybrid system is that one of the two technologies compensates for the shortcomings of the other. In the case of the software system, the results of the binary logarithms were better than those of the individual logarithms [67]. Thereby, it is concluded that the results obtained with hybrid systems hold great promise and are extremely encouraging for the development of a (software-based) prosthetic control system.

Conclusion

Accurate control of prosthetic limbs is one of the biggest challenges currently existing in the scientific field. Measuring brain activity and translating it into commands to control machines and devices using only thoughts is extremely difficult. However, modern technology has penetrated significantly in this field and has made impressive progress, particularly in machine learning and related branches such as neural networks and others and their relationship with medical methods as EEG, EMG and fNIRS. Each of these methods has its own characteristics and shortcomings that have led to its lack of effectiveness in controlling prosthetics. A hybrid system of these technologies may be a solution for achieving higher efficiency in prosthetic control.

It should be noted that future developments for a hybrid system of prosthetic control are not limited to the mentioned technologies but may extend to other technologies as well. EEG, EMG, and fNIRS techniques have proven to be relatively successful in prosthesis control. Additionally, fNIRS is most convenient when combined with EEG and EMG as confirmed by numerous recent studies. In the future, this will be an incentive to investigate these techniques independently or in hybrid form, as they are the closest and most convenient to address each other's shortcomings, leading to a successful hybrid prosthesis management system.

Therefore, it can be summarized more succinctly as follows:

— EEG, EMG and fNIRS systems are still in their individual state in the circle of research and

experimental studies in endeavouring to find a control system for prosthetic limbs.

— The combination of EEG with fNIRS is more superior than the individual system (when EEG is used individually or fNIRS is used individually).

— The combination of EMG with fNIRS is more superior than the individual system (when EMG is used individually or fNIRS is used individually).

— The principle of operation of EEG, as well as EMG depends on muscular activity, and this activity may not be available, while the principle of operation of fNIRS is based on chemical processes that makes it the most suitable to be a complementary tool with EEG or with EMG to create the most promising system for controlling and restoring lost functions.

— There are no studies that indicate the superiority of the EEG with fNIRS system over the EMG with fNIRS system and this is a positive indicator for future studies to find a standardised and comprehensive control system for prosthetic limbs.

References

1. Neelum Y. S., Zareena K., syed Usama A. fNIRS-Based Upper Limb Motion Intention Recognition Using an Artificial Neural Network for Transhumeral Amputees // *Sensors*. 2022. Vol. 22. 726. DOI: 10.3390/s22030726.
2. Asadullayev R. G., Afonin A. N., Shchetinina E. S. Recognition of patterns of motor activity by a neural network based on continuous optical tomography FNIRS data // *Economics. Information technologies*. 2021. Vol. 48, no. 4 P. 735–746. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-735-746. EDN: NFDUBX.
3. Hramov A. E., Maksimenko V. A., Pisarchik A. N. Physical principles of brain–computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain state // *Physics Reports*. 2021. Vol. 918. P. 1–133. DOI: 10.1016/j.physrep.2021.03.002.
4. Peksa J., Mamchur D. State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology // *Sensors* 2023. Vol. 23. 6001. DOI: 10.3390/s23136001.
5. Sergio L. N., Alex C. C., Forti R. M. [et al.]. Revealing the spatiotemporal requirements for accurate subject identification with resting-state functional connectivity: a simultaneous fNIRS-fMRI study // *Neurophotronics*. 2023. Vol. 10(1). DOI: 10.1117/1.NPh.10.1.013510.
6. Klein F. S., Debener K. W., Kranczioch C. fMRI-based validation of continuous-wave fNIRS of supplementary motor area activation during motor execution and motor imagery // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12 (1). DOI: 10.1038/s41598-022-06519-7.
7. Deligani R. J., Borgheai S. B., McLinden J. [et al.]. Multimodal fusion of EEG-fNIRS: a mutual information-based hybrid classification framework // *Biomed Opt Express*. 2021. Vol. 12 (3). 1635. DOI: 10.1364/boe.413666.
8. Asanza V., Pelaez E., Loayza F. [et al.]. Identification of lower-limb motor tasks via brain-computer interfaces: a topical overview // *Sensors*. 2022. Vol. 22 (5). DOI: 10.3390/s22052028.
9. Khajuria A., Sharma R., Joshi D. EEG Dynamics of Locomotion and Balancing: Solution to Neuro-Rehabilitation // *Clinical EEG and Neuroscience*. 2024. Vol. 55 (1). P. 143–163. DOI: 10.1177/15500594221123690.
10. Mondini V., Sburlea A. I., Moller-Putz G. R. Towards unlocking motor control in spinal cord injured by applying an online EEG-based framework to decode motor intention, trajectory and error processing // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 4714. DOI: 10.1038/s41598-024-55413-x.
11. Usama A. S., Zareena K., Neelum Y. S. Control of a Prosthetic Arm using fNIRS, A Neural-Machine Interface // *Data Acquisition – Recent Advances and Applications in Biomedical Engineering*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.93565.

12. Afonin A. N., Asadullaev R. G., Sitnikova M. A. Analysis of data of FNIRS-tomograph for management of LIMB-protoses by means of Brain-computer interface // *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2018. Vol. 11. P. 182–185. EDN: YATOMIP.
13. Dario F., Ning J., Hubertus R. [et al.]. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2014. Vol. 22, no. 4. P. 797–809. DOI: 10.1109/TNSRE.2014.2305111.
14. Becerra-Fajardo L., Minguillon J., Krob M. O. [et al.]. First-in-human demonstration of floating EMG sensors and stimulators wirelessly powered and operated by volume conduction // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2024. Vol. 21 (1). 4. DOI: 10.1186/s12984-023-01295-5.
15. Osama M., Allauddin U. Design and modelling of lower prosthetic limb for additive manufacturing // *Proceedings of IMEC-2022, 14th – 15th January, Karachi, Pakistan*. 2022. 8 p.
16. Satam I. A. A comprehensive study of EEG-based 41 control of artificial arms // *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier*. 2023. Vol. 71, Issue 1. DOI: 10.5937/vojtehg71-41366.
17. Tao S., Zhe Y., Guo Sh. [et al.] Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (17). 9546. DOI: 10.3390/app13179546.
18. Khorasani A., Hulsizer J., Paul V. [et al.]. Myoelectric interface for neurorehabilitation conditioning to reduce abnormal leg co activation after stroke: a pilot study // *Journal NeuroEngineering Rehabil*. 2024. Vol. 21. 11. DOI: 10.1186/s12984-024-01305-0.
19. Asanza V., Pelaez E., Loayza F. [et al.]. Identification of lower-limb motor tasks via brain-computer interfaces: a topical overview. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (5). 2028. DOI: 10.3390/s22052028.
20. Abdalmalak A., Milej D., Cohenet D. [et al.]. Using fMRI to investigate the potential cause of inverse oxygenation reported in fNIRS studies of motor imagery // *Neurosci Lett*. 2020. Vol. 714. 134607. DOI: 10.1016/j.neulet.2019.134607.
21. Wang H., Yan F., Xu T. [et al.]. Brain-Controlled Wheelchair Review: From Wet Electrode to Dry Electrode, from Single Modal to Hybrid Modal, from Synchronous to Asynchronous // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 55920–55938. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3071599.
22. Xu B., Wenlong L., Deping L. [et al.]. Continuous Hybrid BCI Control for Robotic Arm Using Noninvasive Electroencephalogram, Computer Vision, and Eye Tracking // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 4. DOI: 10.3390/math10040618.
23. Sun Z., H. Zihao, D. Feng [et al.]. A Novel Multimodal Approach for Hybrid Brain-Computer Interface // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 89909–89918. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2994226.
24. Pichiorri F., Toppi J., de Seta V. [et al.]. Exploring high-density corticomuscular networks after stroke to enable a hybrid Brain-Computer Interface for hand motor rehabilitation // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2023. Vol. 20(1). DOI: 10.1186/s12984-023-01127-6.
25. Si J., Yang Y., Xu L. [et al.]. Evaluation of residual cognition in patients with disorders of consciousness based on functional near-infrared spectroscopy // *Neurophotonics*. 2023. Vol. 10, no. 2. DOI: 10.1117/1.nph.10.2.025003.
26. Hamid H., Naseer N., Nazeer H. [et al.]. Analyzing Classification Performance of fNIRS-BCI for Gait Rehabilitation Using Deep Neural Networks // *Sensors*. Vol. 22 (5). 1932. DOI: 10.3390/s22051932, 2022.
27. Mustafa A. H. H., Muhammad U. K., Deepti M. A. Computationally Efficient Method for Hybrid EEG-fNIRS BCI Based on the Pearson Correlation // *BioMed Research International*. 2020. Vol. 2020. 1838140. 13 p. DOI: 10.1155/2020/1838140.
28. Sial M. B., Wang S., Wang X. [et al.]. A Survey on EEG – fNIRS based Non-invasive hBCIs // *2021 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*. 2021. P. 240–245. DOI: 10.1109/ICAI52203.2021.9445246.
29. Wang Z., Lu Y., Yijie Z. [et al.]. Incorporating EEG and fNIRS Patterns to Evaluate Cortical Excitability and MI-BCI Performance During Motor Training // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023. Vol. 31. P. 2872–2882. DOI: 10.1109/TNSRE.2023.3281855.
30. Radha H. M., Karim A., Ali Al-Timemy H. University of Baghdad [et al.]. Recognition of Upper Limb Movements Based on Hybrid EEG and EMG Signals for Human-Robot Interaction // *Iraqi Journal of Computer Communication Control and System Engineering*. 2023. Vol. 23, no. 2. DOI: 10.33103/uoit.ijccce.23.2.14.
31. Lubo F., Haoyang L., Hongfei J. [et al.]. EEG-EMG analysis method in hybrid brain computer interface for hand rehabilitation training // *Computing and Informatics*. 2023. Vol. 42 (3). P. 741–761. DOI: 10.31577/cai_2023_3_741.
32. Kwon J., Shin J., Im C. H. Toward a compact hybrid brain-computer interface (BCI): Performance evaluation of multi-class hybrid EEG-fNIRS BCIs with limited number of channels // *PLoS One*. 2020. Vol. 15, no. 3. DOI: 10.1371/journal.pone.0230491.
33. Beniczky S., Donald L. S. Electroencephalography: basic biophysical and technological aspects important for clinical applications // *Epileptic Disord*. 2020. Vol. 22, no. 6. DOI: 10.1684/epd.2020.1217.
34. Marius V. D., Hadâr A., Goga N. [et al.]. Design and implementation of an eeg-based bci prosthetic lower limb using raspberry PI 4 // *U.P.B. Sci. Bull., Series C*. 2023. Vol. 85, Issue. 3. P. 353–366.
35. He L., Guo Sh., Bu D. [et al.]. Subject-Independent Estimation of Continuous Movements Using CNN-LSTM for a Home-Based Upper Limb Rehabilitation System // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023. P. 1–8. DOI: 10.1109/LRA.2023.3303701.
36. Jin H. Li C., Sun L., Hu H. [et al.]. To classify two-dimensional motion state of step length and walking speed by applying cerebral hemoglobin information // *2017 10th International Conference on Human System Interactions (HSI)*. 2017. P. 216–222. DOI: 10.1109/HSI.2017.8005032.
37. Yang L., Song Y., Ma K. [et al.]. A novel motor imagery EEG decoding method based on feature separation // *Journal of Neural Engineering*. 2021. Vol. 18. 036022. DOI:10.1088/1741-2552/abe39b.
38. Milanés D. H., Codorniu R. T., Baracaldo R. [et al.]. Shallow Convolutional Network Excel for Classifying Motor Imagery EEG in BCI Applications // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 98275–98286. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091399.
39. Aydin E. A. Subject-specific feature selection for near infrared spectroscopy based brain–computer interfaces // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2020. Vol. 195 (12). 105535. DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105535.
40. Bin Abdul Ghaffar M. S., Khan U. S., Naseer N. [et al.]. Improved Classification Accuracy of Four Class FNIRS-BCI // *2020 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ECAI50035.2020.9223258.
41. Guo W. C., Zhang X., Liu H. [et al.]. Toward an enhanced human machine interface for upper-limb prosthesis control with combined EMG and NIRS signals // *IEEE Trans. Human-Mach. Syst*. 2017. Vol. 47, no. 4. P. 1–12. 564575. DOI: 10.1109/THMS.2016.2641389.
42. Lin J. F. L. Dual-MEG interbrain synchronization during turn-taking verbal interactions between mothers and children // *Cerebral Cortex*. 2023. Vol. 33 (7). P. 4116–4134. DOI: 10.1093/cercor/bhac330.
43. Maher A., Salankar N., Qaisar S. M. [et al.]. Hybrid EEG-fNIRS brain-computer interface based on the non-linear features extraction and stacking ensemble learning // *Journal of Applied Biomedicine*. 2023. Vol. 43 (1). P. 463–475. DOI: DOI:10.1016/j.bbe.2023.05.001.
44. Liu Z., Shore J., Wang M. [et al.]. A systematic review on hybrid EEG/fNIRS in brain-computer interface // *Biomed Signal Process Control*. 2021. Vol. 68. 102595. DOI:10.1016/j.bspc.2021.102595.

45. Xu T., Yang Y., Zhou Zh. [et al.]. Motor Imagery Decoding Enhancement Based on Hybrid EEG–fNIRS Signals // *IEEE Access*. 2023. Vol. 1(1). P. 1–12. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3289709.
46. Li R., Yang D., Fang F. [et al.]. Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 15. 5865. DOI: 10.3390/s22155865.
47. Chunfu L., Ruite G., Zhichuan T. [et al.]. Multi-channel FES gait rehabilitation assistance system based on adaptive sEMG modulation // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023. Vol. 31. P. 3652–3663. DOI: 10.1109/tnsre.2023.3313617.
48. Song T., Yan Z., Guo S. [et al.]. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 17. DOI: 10.3390/app13179546.
49. Radek M., Martina L., Michaela S. [et al.]. Advanced bioelectrical signal processing methods: Past, present, and future approach — Part III: Other biosignals // *Sensors*. 2021. Vol. 21 (18). 6064. DOI: 10.3390/s21186064.
50. Cheng X., Sie E. J., Boas D. A. [et al.]. Choosing an optimal wavelength to detect brain activity in functional near-infrared spectroscopy // *Optics Letters*. 2021. Vol. 46 (4). 924. DOI: 10.1364/ol.418284.
51. Kimoto H. F., Machida M. A wireless multi-layered EMG/MMG/NIRS sensor for muscular activity evaluation // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (3). 1539. DOI: 10.3390/s23031539.
52. Giminiari R. D., Marco C., Marco F. [et al.]. Validation of fabric-based thigh-wearable EMG sensors and oximetry for monitoring quadriceps activity during strength and endurance exercises // *Sensors*. 2020. Vol. 17. P. 1–13. 4664. DOI: 10.3390/s20174664.
53. Daniel N., Sybilski K., Kaczmarek W. [et al.]. Relationship between EMG and fNIRS during Dynamic Movements // *Sensors*. 2023. Vol. 23 (11). 5004. DOI: 10.3390/s23115004.
54. Atzori M., Gijssberts A., Castellini C. [et al.]. Electromyography data for non-invasive naturally-controlled robotic hand prostheses // *Nature*. 2014. Vol. 1. DOI: 10.1038/sdata.2014.53.
55. Dario F., Ning J., Hubertus R. [et al.]. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2014. Vol. 22, no. 4. P. 797–809. DOI:10.1109/TNSRE.2014.2305111.
56. Arif A., Khan M., Kashif J. [et al.]. Hemodynamic response detection using integrated EEG–fNIRS-VPA for BCI // *Computers, Materials and Continua*. 2021. Vol. 70., no. 1. P. 535–555. DOI: 10.32604/cmc.2022.018318.
57. Kwak Y., Song W. J., Kim S. E. FGANet: FNIRS-Guided Attention Network for Hybrid EEG–fNIRS Brain-Computer Interfaces // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2022. Vol. 30. P. 329–339. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3149899.
58. Neelum Y. S., Zareena K., Usama S. [et al.]. Enhancing classification accuracy of transhumeral prosthesis: a hybrid sEMG and fNIRS approach // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 113246–113257. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099973.
59. Nsugbe E., Phillips C., Fraser M. F. [et al.]. Gesture recognition for transhumeral prosthesis control using EMG and NIR // *IET Cyber-Systems and Robotics*. 2020. Vol. 2, Issue 3. P. 122–131. DOI: 10.1049/iet-csr.2020.0008.
60. Xiang Z., Yao L., Wang X. [et al.]. A Survey on Deep Learning-based Non-Invasive Brain Signals: Recent Advances and New Frontiers // *Journal of Neural Engineering*. 2020. Vol. 18 (3). DOI:10.1088/1741-2552/abc902.
61. Moufassih M., Tarahi O., Hamou S. [et al.]. Boosting motor imagery brain-computer interface classification using multiband and hybrid feature extraction // *Multimedia Tools and Applications*. 2023. Vol. 83 (16). P. 1–32. DOI: 10.1007/s11042-023-17118-7.
62. Shelishiyah R., Dharan M., Kumar T. [et al.]. Signal Processing for Hybrid BCI Signals // *Journal of Physics Conference Series*. 2022. Vol. 2318 (1). 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/2318/1/012007.
63. Ali M. U., Kim K. S., Kallu K. D. [et al.]. OptEF-BCI: An Optimization-Based Hybrid EEG and fNIRS–Brain Computer Interface // *Bioengineering*. 2023. Vol. 10, no. 5. DOI: 10.3390/bioengineering10050608.
64. Brian F. S., Charles P., Christopher H. [et al.]. The evolution of neuromodulation for chronic stroke: From neuroplasticity mechanisms to brain-computer interfaces // *Neurotherapeutics*. 2024. Vol. 21, Issue 3. e00337. DOI 10.1016/j.neurot.2024.e00337.
65. Na L., Rui Z., Bharath K. [et al.]. Non-invasive Techniques for Muscle Fatigue Monitoring: A Comprehensive Survey // *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56, Issue 9. 221. P. 1–40. DOI: 10.1145/3648679.
66. Samandari A. M. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) as a hybrid system: a review // *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024. Vol. 12 (1). P. 1–18. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.005.
67. Marinelli A., Canepa M., Domenico D. D. [et al.]. A comparative optimization procedure to evaluate pattern recognition algorithms on hannes prosthesis // *Neurocomputing*. 2024. Vol. 569 (7). 127123. DOI: 10.1016/j.neucom.2023.127123.

SAMANDARI Ali Mirdan, Graduate Student, Belgorod State National Research University, Belgorod.
Correspondence address: aliofphysics777ali@gmail.com

For citations

Samandari A. M. Promising systems for controlling prosthetics: a review // *Omsk Scientific Bulletin*. No. 4 (192). P. 150–160. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-150-160.

Received March 26, 2024.

© **A. M. Samandari**

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОТЕЗАМИ: ОБЗОР

Люди с ограниченными возможностями в условиях стремительной научно-технической революции надеются, что она преодолет лишь оказание им поддержки и найдет подходящие решения, чтобы вести нормальную жизнь. Взаимодействие наук между собой учитывает проблему физических недостатков и, в частности, потерю как верхних, так и нижних конечностей. Современные протезы являются продуктом пересечения науки и технологической революции и все еще находятся на пути своего становления, поскольку содержат исполнительные механизмы, которые могут управляться сигналами мозга по принципу нейроинтерфейсов. Методы нейровизуализации, такие как электромиография, функциональная инфракрасная спектроскопия и электроэнцефалография, являются превосходными методами управления этими современными протезами, которые можно смоделировать по двум функциям, а именно по независимой работе и гибридной работе. В свете этих данных статья рассматривает эти системы в их индивидуальных и гибридных состояниях. Кроме того, в статье указывается, какой из этих методов может быть выбран в качестве предпочтительной системы. Область применения методологии исследования ограничена методами нейровизуализации в отношении сценариев неврологической реабилитации и восстановления утраченных функций. Обзор имеет три направления. Первое направление собирает, обобщает и оценивает информацию из соответствующих исследований, опубликованных за последнее десятилетие. Второе представляет важные результаты предыдущих экспериментальных результатов в этой области в отношении текущих исследований. Исследование было проведено систематически, чтобы предоставить всем экспертам и ученым полное представление и основанные на доказательствах методы управления протезами. Третья часть заключается в выявлении широкой области знаний, требующей дальнейшего изучения, и отслеживании последовательности научных достижений в этих системах и возможности интеграции между собой для создания наиболее перспективной системы управления протезами.

Ключевые слова: инвалидность, электроэнцефалография, электромиография, функциональная инфракрасная спектроскопия, гибридный интерфейс мозг-компьютер, система управления, операторы, протезы.

Библиографический список

1. Neelum Y. S., Zareena K., syed Usama A. fNIRS-Based Upper Limb Motion Intention Recognition Using an Artificial Neural Network for Transhumeral Amputees // *Sensors*. 2022. Vol. 22. 726. DOI: 10.3390/s22030726. (In Engl.).
2. Асадуллаев Р. Г., Афонин А. Н., Щетинина Е. С. Распознавание паттернов двигательной активности нейронной сетью по непрерывным данным оптической томографии fNIRS // *Экономика. Информатика*. 2022. Т. 48 (4). С. 735–746. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-735-746. EDN: NFDUBX. (In Russ.).
3. Hramov A. E., Maksimenko V. A., Pisarchik A. N. Physical principles of brain–computer interfaces and their applications for rehabilitation, robotics and control of human brain state // *Phys Rep*. 2021. Vol. 918. P. 1–133. DOI: 10.1016/j.physrep.2021.03.002. DOI: 10.3390/s22030726. (In Engl.).
4. Peksa J., Mamchur D. State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology // *Sensors* 2023. Vol. 23. 6001. DOI: 10.3390/s23136001. (In Engl.).
5. Sergio L. N., Alex C. C., Forti R. M. [et al.]. Revealing the spatiotemporal requirements for accurate subject identification with resting-state functional connectivity: a simultaneous fNIRS-fMRI study // *Neurophotonics*. 2023. Vol. 10(1). DOI: 10.1117/1.NPh.10.1.013510. (In Engl.).
6. Klein F. S., Debener K. W., Kranczioch C. fMRI-based validation of continuous-wave fNIRS of supplementary motor area activation during motor execution and motor imagery // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12 (1). DOI: 10.1038/s41598-022-06519-7. (In Engl.).
7. Deligani R. J., Borgheai S. B., McLinden J. [et al.]. Multimodal fusion of EEG-fNIRS: a mutual information-based hybrid classification framework // *Biomed Opt Express*. 2021. Vol. 12 (3). 1635. DOI: 10.1364/boe.413666. (In Engl.).
8. Asanza V., Pelaez E., Loayza F. [et al.]. Identification of lower-limb motor tasks via brain-computer interfaces: a topical overview // *Sensors*. 2022. Vol. 22 (5). DOI: 10.3390/s22052028. (In Engl.).
9. Khajuria A., Sharma R., Joshi D. EEG Dynamics of Locomotion and Balancing: Solution to Neuro-Rehabilitation //

- Clinical EEG and Neuroscience. 2024. Vol. 55 (1). P. 143–163. DOI: 10.1177/15500594221123690. (In Engl.).
10. Mondini V., Sburlea A. I., Мyller-Putz G. R. Towards unlocking motor control in spinal cord injured by applying an online EEG-based framework to decode motor intention, trajectory and error processing // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 4714. DOI: 10.1038/s41598-024-55413-x. (In Engl.).
11. Usama A. S., Zareena K., Neelum Y. S. Control of a Prosthetic Arm using fNIRS, A Neural-Machine Interface // *Data Acquisition – Recent Advances and Applications in Biomedical Engineering*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.93565. (In Engl.).
12. Афонин А. Н., Асадуллаев Р. Г., Ситникова М. А. Анализ данных FNIRS-томографа для управления протезами конечностей с помощью интерфейса мозг-компьютер // *Научно-технический Вестник Поволжья*. 2018. Т. 11. С. 182–185. EDN: YTOMIP. (In Russ.).
13. Dario F., Ning J., Hubertus R. [et al.]. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2014. Vol. 22, no. 4. P. 797–809. DOI: 10.1109/TNSRE.2014.2305111. (In Engl.).
14. Becerra-Fajardo L., Minguillon J., Krob M. O. [et al.]. First-in-human demonstration of floating EMG sensors and stimulators wirelessly powered and operated by volume conduction // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2024. Vol. 21 (1). 4. DOI: 10.1186/s12984-023-01295-5. (In Engl.).
15. Osama M., Allaiddin U. Design and modelling of lower prosthetic limb for additive manufacturing // *Proceedings of IMEC-2022, 14th – 15th January, Karachi, Pakistan*. 2022. 8 p. (In Engl.).
16. Satam I. A. A comprehensive study of EEG-based control of artificial arms // *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier*. 2023. Vol. 71, Issue 1. DOI: 10.5937/vojtehg71-41366. (In Engl.).
17. Tao S., Zhe Y., Guo Sh. [et al.] Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (17). 9546. DOI: 10.3390/app13179546. (In Engl.).
18. Khorasani A., Hulsizer J., Paul V. [et al.]. Myoelectric interface for neurorehabilitation conditioning to reduce abnormal leg co activation after stroke: a pilot study // *Journal of NeuroEngineering Rehabil.* 2024. Vol. 21. 11. DOI: 10.1186/s12984-024-01305-0. (In Engl.).
19. Asanza V., Pelaez E., Loayza F. [et al.]. Identification of lower-limb motor tasks via brain-computer interfaces: a topical overview. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (5). 2028. DOI: 10.3390/s22052028. (In Engl.).
20. Abdalmalak A., Milej D., Cohenet D. [et al.]. Using fMRI to investigate the potential cause of inverse oxygenation reported in fNIRS studies of motor imagery // *Neurosci Lett*. 2020. Vol. 714. 134607. DOI: 10.1016/j.neulet.2019.134607. (In Engl.).
21. Wang H., Yan F., Xu T. [et al.]. Brain-Controlled Wheelchair Review: From Wet Electrode to Dry Electrode, from Single Modal to Hybrid Modal, from Synchronous to Asynchronous // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 55920–55938. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3071599. (In Engl.).
22. Xu B., Wenlong L., Deping L. [et al.]. Continuous Hybrid BCI Control for Robotic Arm Using Noninvasive Electroencephalogram, Computer Vision, and Eye Tracking // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 4. DOI: 10.3390/math10040618. (In Engl.).
23. Sun Z., Zihao H., Feng D. [et al.]. A Novel Multimodal Approach for Hybrid Brain-Computer Interface // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 89909–89918. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2994226. (In Engl.).
24. Pichiorri F., Toppi J., de Seta V. [et al.]. Exploring high-density corticomuscular networks after stroke to enable a hybrid Brain-Computer Interface for hand motor rehabilitation // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2023. Vol. 20(1). DOI: 10.1186/s12984-023-01127-6. (In Engl.).
25. Si J., Yang Y., Xu L. [et al.]. Evaluation of residual cognition in patients with disorders of consciousness based on functional near-infrared spectroscopy // *Neurophotonics*. 2023. Vol. 10, no. 2. DOI: 10.1117/1.nph.10.2.025003. (In Engl.).
26. Hamid H., Naseer N., Nazeer H. [et al.]. Analyzing Classification Performance of fNIRS-BCI for Gait Rehabilitation Using Deep Neural Networks // *Sensors*. Vol. 22 (5). 1932. DOI: 10.3390/s22051932, 2022. (In Engl.).
27. Mustafa A. H. H., Muhammad U. K., Deepti M. A. Computationally Efficient Method for Hybrid EEG-fNIRS BCI Based on the Pearson Correlation // *BioMed Research International*. 2020. Vol. 2020. 1838140. 13 p. DOI: 10.1155/2020/1838140. (In Engl.).
28. Sial M. B., Wang S., Wang X. [et al.]. A Survey on EEG-fNIRS based Non-invasive hBCIs // *2021 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*. 2021. P. 240–245. DOI: 10.1109/ICAI52203.2021.9445246. (In Engl.).
29. Wang Z., Lu Y., Yijie Z. [et al.]. Incorporating EEG and fNIRS Patterns to Evaluate Cortical Excitability and MI-BCI Performance During Motor Training // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023. Vol. 31. P. 2872–2882. DOI: 10.1109/TNSRE.2023.3281855. (In Engl.).
30. Radha H. M., Karim A., Ali Al-Timemy H. University of Baghdad [et al.]. Recognition of Upper Limb Movements Based on Hybrid EEG and EMG Signals for Human-Robot Interaction // *Iraqi Journal of Computer Communication Control and System Engineering*. 2023. Vol. 23, no. 2. DOI: 10.33103/uo.ijccce.23.2.14. (In Engl.).
31. Lubo F., Haoyang L., Hongfei J. [et al.]. EEG-EMG analysis method in hybrid brain computer interface for hand rehabilitation training // *Computing and Informatics*. 2023. Vol. 42 (3). P. 741–761. DOI: 10.31577/cai_2023_3_741. (In Engl.).
32. Kwon J., Shin J., Im C. H. Toward a compact hybrid brain-computer interface (BCI): Performance evaluation of multi-class hybrid EEG-fNIRS BCIs with limited number of channels // *PLoS One*. 2020. Vol. 15, no. 3. DOI: 10.1371/journal.pone.0230491. (In Engl.).
33. Beniczky S., Donald L. S. Electroencephalography: basic biophysical and technological aspects important for clinical applications // *Epileptic Disord*. 2020. Vol. 22, no. 6. DOI: 10.1684/epd.2020.1217. (In Engl.).
34. Marius V. D., Hadär A., Goga N. [et al.]. Design and implementation of an eeg-based bci prosthetic lower limb using raspberry PI 4 // *U.P.B. Sci. Bull., Series C*. 2023. Vol. 85, Issue. 3. P. 353–366. (In Engl.).
35. He L., Guo Sh., Bu D. [et al.]. Subject-Independent Estimation of Continuous Movements Using CNN-LSTM for a Home-Based Upper Limb Rehabilitation System // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023. P. 1–8. DOI: 10.1109/LRA.2023.3303701. (In Engl.).
36. Jin H. Li C., Sun L., Hu H. [et al.]. To classify two-dimensional motion state of step length and walking speed by applying cerebral hemoglobin information // *2017 10th International Conference on Human System Interactions (HSI)*. 2017. P. 216–222. DOI: 10.1109/HSI.2017.8005032. (In Engl.).
37. Yang L., Song Y., Ma K. [et al.]. A novel motor imagery EEG decoding method based on feature separation // *Journal of Neural Engineering*. 2021. Vol. 18. 036022. DOI: 10.1088/1741-2552/abe39b. (In Engl.).
38. Milanés D. H., Codorniu R. T., Baracaldo R. [et al.]. Shallow Convolutional Network Excel for Classifying Motor Imagery EEG in BCI Applications // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 98275–98286. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091399. (In Engl.).
39. Aydin E. A. Subject-specific feature selection for near infrared spectroscopy based brain-computer interfaces // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2020. Vol. 195 (12). 105535. DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105535. (In Engl.).
40. Bin Abdul Ghaffar M. S., Khan U. S., Naseer N. [et al.]. Improved Classification Accuracy of Four Class FNIRS-BCI //

2020 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ECAI50035.2020.9223258. (In Engl.).

41. Guo W. C., Zhang X., Liu H. [et al.]. Toward an enhanced human machine interface for upper-limb prosthesis control with combined EMG and NIRS signals // *IEEE Trans. Human-Mach. Syst.* 2017. Vol. 47, no. 4. P. 1–12. 564575. DOI: 10.1109/THMS.2016.2641389. (In Engl.).

42. Lin J. F. L. Dual-MEG interbrain synchronization during turn-taking verbal interactions between mothers and children // *Cerebral Cortex.* 2023. Vol. 33 (7). P. 4116–4134. DOI: 10.1093/cercor/bhac330. (In Engl.).

43. Maher A., Salankar N., Qaisar S. M. [et al.]. Hybrid EEG-fNIRS brain-computer interface based on the non-linear features extraction and stacking ensemble learning // *Journal of Applied Biomedicine.* 2023. Vol. 43 (1). P. 463–475. DOI: DOI:10.1016/j.bbe.2023.05.001. (In Engl.).

44. Liu Z., Shore J., Wang M. [et al.]. A systematic review on hybrid EEG/fNIRS in brain-computer interface // *Biomed Signal Process Control.* 2021. Vol. 68. 102595. DOI:10.1016/j.bspc.2021.102595. (In Engl.).

45. Xu T., Yang Y., Zhou Zh. [et al.]. Motor Imagery Decoding Enhancement Based on Hybrid EEG-fNIRS Signals // *IEEE Access.* 2023. Vol. 1(1). P. 1–12. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3289709. (In Engl.).

46. Li R., Yang D., Fang F. [et al.]. Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review // *Sensors.* 2022. Vol. 22, no. 15. 5865. DOI: 10.3390/s22155865. (In Engl.).

47. Chunfu L., Ruite G., Zhichuan T. [et al.]. Multi-channel FES gait rehabilitation assistance system based on adaptive sEMG modulation // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering.* 2023. Vol. 31. P. 3652–3663. DOI: 10.1109/tnsre.2023.3313617. (In Engl.).

48. Song T., Yan Z., Guo S. [et al.]. Review of sEMG for Robot Control: Techniques and Applications // *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13, no. 17. DOI: 10.3390/app13179546. (In Engl.).

49. Radek M., Martina L., Michaela S. [et al.]. Advanced bioelectrical signal processing methods: Past, present, and future approach – Part III: Other biosignals // *Sensors.* 2021. Vol. 21 (18). 6064. DOI: 10.3390/s21186064. (In Engl.).

50. Cheng X., Sie E. J., Boas D. A. [et al.]. Choosing an optimal wavelength to detect brain activity in functional near-infrared spectroscopy // *Optics Letters.* 2021. Vol. 46 (4). 924. DOI: 10.1364/ol.418284. (In Engl.).

51. Kimoto H. F., Machida M. A wireless multi-layered EMG/MMG/NIRS sensor for muscular activity evaluation // *Sensors.* 2023. Vol. 23 (3). 1539. DOI: 10.3390/s23031539. (In Engl.).

52. Giminiari R. D., Marco C., Marco F. [et al.]. Validation of fabric-based thigh-wearable EMG sensors and oximetry for monitoring quadriceps activity during strength and endurance exercises // *Sensors.* 2020. Vol. 17. P. 1–13. 4664. DOI: 10.3390/s20174664. (In Engl.).

53. Daniel N., Sybilski K., Kaczmarek W. [et al.]. Relationship between EMG and fNIRS during Dynamic Movements // *Sensors.* 2023. Vol. 23 (11). 5004. DOI: 10.3390/s23115004. (In Engl.).

54. Atzori M., Gijberts A., Castellini C. [et al.]. Electromyography data for non-invasive naturally-controlled robotic hand prostheses // *Nature.* 2014. Vol. 1. DOI: 10.1038/sdata.2014.53. (In Engl.).

55. Dario F., Ning J., Hubertus R. [et al.]. The extraction of neural information from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: Emerging avenues and challenges // *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 2014. Vol. 22, no. 4. P. 797–809. DOI: 10.1109/TNSRE.2014.2305111. (In Engl.).

56. Arif A., Khan M., Kashif J. [et al.]. Hemodynamic response detection using integrated EEG-fNIRS-VPA for BCI // *Computers,*

Materials and Continua. 2021. Vol. 70, no. 1. P. 535–555. DOI: 10.32604/cmc.2022.018318. (In Engl.).

57. Kwak Y., Song W. J., Kim S. E. FGANet: FNIRS-Guided Attention Network for Hybrid EEG-fNIRS Brain-Computer Interfaces // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering.* 2022. Vol. 30. P. 329–339. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3149899. (In Engl.).

58. Neelum Y. S., Zareena K., Usama S. [et al.]. Enhancing classification accuracy of transhumeral prosthesis: a hybrid sEMG and fNIRS approach // *IEEE Access.* 2021. Vol. 9. P. 113246–113257. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099973. (In Engl.).

59. Nsugbe E., Phillips C., Fraser M. F. [et al.]. Gesture recognition for transhumeral prosthesis control using EMG and NIR // *IET Cyber-Systems and Robotics.* 2020. Vol. 2, Issue 3. P. 122–131. DOI: 10.1049/iet-csr.2020.0008. (In Engl.).

60. Xiang Z., Yao L., Wang X. [et al.]. A Survey on Deep Learning-based Non-Invasive Brain Signals: Recent Advances and New Frontiers // *Journal of Neural Engineering.* 2020. Vol. 18 (3). DOI:10.1088/1741-2552/abc902. (In Engl.).

61. Moufassih M., Tarahi O., Hamou S. [et al.]. Boosting motor imagery brain-computer interface classification using multiband and hybrid feature extraction // *Multimedia Tools and Applications.* 2023. Vol. 83 (16). P. 1–32. DOI: 10.1007/s11042-023-17118-7. (In Engl.).

62. Shelishiyah R., Dharan M., Kumar T. [et al.]. Signal Processing for Hybrid BCI Signals // *Journal of Physics Conference Series.* 2022. Vol. 2318 (1). 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/2318/1/012007. (In Engl.).

63. Ali M. U., Kim K. S., Kallu K. D. [et al.]. OptEF-BCI: An Optimization-Based Hybrid EEG and fNIRS–Brain Computer Interface // *Bioengineering.* 2023. Vol. 10, no. 5. DOI: 10.3390/bioengineering10050608. (In Engl.).

64. Brian F. S., Charles P., Christopher H. [et al.]. The evolution of neuromodulation for chronic stroke: From neuroplasticity mechanisms to brain-computer interfaces // *Neurotherapeutics.* 2024. Vol. 21, Issue 3. e00337. DOI 10.1016/j.neurot.2024.e00337. (In Engl.).

65. Na L., Rui Z., Bharath K. [et al.]. Non-invasive Techniques for Muscle Fatigue Monitoring: A Comprehensive Survey // *ACM Computing Surveys.* 2024. Vol. 56, Issue 9. 221. P. 1–40. DOI: 10.1145/3648679. (In Engl.).

66. Samandari A. M. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) as a hybrid system: a review // *Modeling, Optimization and Information Technology.* 2024. Vol. 12 (1). P. 1–18. DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.005. (In Engl.).

67. Marinelli A., Canepa M., Domenico D. D. [et al.]. A comparative optimization procedure to evaluate pattern recognition algorithms on hannes prosthesis // *Neurocomputing.* 2024. Vol. 569 (7). 127123. DOI: 10.1016/j.neucom.2023.127123. (In Engl.).

САМАНДАРИ Али Мирдан, аспирант Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород.

Адрес для переписки: aliofphysics777ali@gmail.com

Для цитирования

Самандари А. М. Перспективные системы для управления протезами: обзор // Омский научный вестник. № 4 (192). С. 150–160. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-150-160.

Статья поступила в редакцию 26.03.2024 г.

© Самандари Али Мирдан

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