

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

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

2025

№ 1 (193)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 1 (193) 2025

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

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

Страница журнала на сайте учредителя:
[http://www.omgtu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_omsk_research_journal/](http://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/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 20.02.2025 г.
Дата выхода в свет 28.02.2025 г.

Формат 60x84 1/8.
12,32 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 4
Цена свободная

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СУШКОВ Валерий Валентинович, д. т. н., профессор,
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 (ЛНТИ), Бэньси, Китай

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

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

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

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

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



OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.
Published 4 times a year

№ 1 (193) 2025

FOUNDER

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

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

Identification number
of registered Mass Media
ПМ № 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.omgtu.ru>

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgtu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_oms_k_research_journal/](http://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_oms_k_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 20.02.2025
Date of Publication 28.02.2025

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 12,32
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 4
Open Price

EDITORIAL STAFF

KROPOTIN Oleg Vitalyevich (Chief Editor), D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

OVCHARENKO Sergey Mikhaylovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

GALIEV Ilkham Islamovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

AVDEEVA Diana Konstantinovna, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

AUSHEEV Tumen Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

BUBNOV Aleksey Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

VAVILOV Vladimir Platonovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

GORYUNOV Vladimir Nikolaevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

GRADOBOEV Alexander Vasilievich, D. Sc. (Technical), Professor,
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

KARPOV Valeriy Vasilyevich, D. Sc. (Economic), Professor,
Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Omsk, Russia

KOZLOV Aleksandr Gennadyevich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

KUZNETSOV Andrey Albertovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

LI Weimin, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China

MAYSTRENKO Vasily Andreevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

MENG Zhaojun, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China

NAUMENKO Alexander Petrovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

NOVIKOV Alexey Alexeevich, D. Sc. (Technical),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

NOVOZHILOV Aleksandr Nikolayevich, D. Sc. (Technical), Professor,
S.Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

OSIPOV Dmitry Sergeevich, D. Sc. (Technical),
Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

PANCHUK Konstantin Leonidovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

POLESHCHENKO Konstantin Nikolayevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

POLISHCHUK Vladimir Isifovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

POPOV Andrey Yuryevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

RAUBA Alexander Aleksandrovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

ROTKOV Sergey Igorevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

SUSHKOV Valery Valentinovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

SYZRANTSEV Vladimir Nikolaevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

TATEVOSYAN Andrey Alexandrovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

TOLOK Aleksey Vyacheslavovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

FEDOROV Alexey Arkadievich, Cand. Sc. (Technical),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

KHARLAMOV Victor Vasilievich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russia

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

HUANG Zhidong, Doctor, Professor,
Liaoning Institute of Science and Technology (LIST), Benxi, China

CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich, D. Sc. (Technical), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

SHALAY Viktor Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

SCHERBA Victor Evgenievich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

YURKOV Viktor Yuryevich, D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia

YAKOVLEVA Elena Vladimirovna, D. Sc. (Economic), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Л. А. Сладкова, Д. И. Скрипников. Методика расчета параметров механизма поворотно-ударного действия	5
Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова, Л. Ю. Волкова, В. В. Рындин. Кинематический расчет эксцентриковых механизмов с использованием программы MATHCAD	13
В. А. Третьякова, С. С. Воронин. Разработка этапов оценки трудоемкости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на производственных предприятиях	21
А. В. Шимохин, А. Н. Сорокин, С. Н. Болтовский, В. Н. Кузнецова, И. С. Кузнецов. Исследование прочностных свойств изделий, полученных с помощью 3D-печати, при деформации изгиба для оптимизации распределения материала	30
Н. В. Бобков, А. А. Федоров, С. В. Петрович, Н. С. Артеменко, Р. В. Чулков. Поиск оптимальных значений параметров режима проволоочной электроэрозионной обработки деталей из циркониевого сплава Э110	38

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. В. Сушков, В. Н. Горюнов, Е. Е. Ревякин. Повышение эффективности электротехнической системы буровой установки с системой накопления электроэнергии	50
И. В. Ярошенко, В. В. Носенко, М. С. Алтунина, Ю. П. Аксенов. Опыт определения технического состояния и оценка ресурса трансформаторов по результатам комплексного диагностического обследования	58
А. И. Голоднова, М. В. Ерпалов, А. И. Голоднов. Математическая модель материального баланса твердооксидного электролизера	68
А. В. Петухов. Разработка и исследование системы управления групповым частотно-регулируемым приводом с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в сети	76
А. С. Макаров, В. В. Харламов, Д. И. Попов. Моделирование процесса изнашивания и оценка остаточного ресурса щеточного узла синхронного тягового генератора	84
А. К. Торопова, В. В. Черепанов. Расчет режима высших гармоник в электрических сетях фанерных производств	91

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

С. В. Бирюков. Двухкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа	98
---	----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

L. A. Sladkova, D. I. Skripnikov. Method for calculating the parameters of the rotary-impact mechanism	5
Yu. P. Makushev, T. A. Polyakova, L. Yu. Volkova, V. V. Ryndin. Kinematic calculation of eccentric mechanisms using the Mathcad software	13
V. A. Tretyakova, S. S. Voronin. Development of stages for assessing labor intensity of research and development in manufacturing enterprises	21
A. V. Shimokhin, A. N. Sorokin, S. N. Boltovsky, V. N. Kuznetsova, I. S. Kuznetsov. Investigation of the strength property of 3D printed products in bending deformation to optimize material distribution	30
N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, S. V. Petrochenko, N. S. Artemenko, R. V. Chulkov. Search for optimal parameters of wire electrical discharge machining of parts made from E110 zirconium alloy	38

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

V. V. Sushkov, V. N. Goryunov, E. E. Revyakin. Advancing efficiency of a drilling rig electrical system with a battery energy storage system	50
I. V. Yaroshenko, V. V. Nosenko, M. S. Altunina, Yu. P. Aksenov. Experience in determining technical condition and evaluating the lifetime of transformers based on the results of a comprehensive diagnostic examination	58
A. I. Golodnova, M. V. Erpalov, A. I. Golodnov. The use of mathematical model to evaluate the material balance of a solid oxide electrolyser	68
A. V. Petukhov. Development and research of the control system of the group variable frequency drive with increased resistance to network voltage sags	76
A. S. Makarov, V. V. Kharlamov, D. I. Popov. Methodology development for estimating the residual resource of diesel locomotive traction generator brushes	84
A. K. Toropova, V. V. Cherepanov. Calculation of the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production	91

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

S. V. Biryukov. Two-component spherical dual-type electric field strength sensor	98
---	----

УДК 622.233.05
DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-5-12
EDN: VLYDAR

Л. А. СЛАДКОВА
Д. И. СКРИПНИКОВ

Российский университет транспорта,
г. Москва

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТНО-УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Современные механизмы ударно-поворотного действия для разрушения прочных и мерзлых грунтов имеют громоздкую и сложную конструкцию. Разработка методики усовершенствования конструкции механизма поворотно-ударного действия позволяет решить задачу снижения энергоемкости процесса разрушения грунта. Алгоритм определения геометрических параметров механизма поворотно-ударного действия научно обоснован исходя из анализа состояния вопроса современных технических решений буровых установок и физических основ взаимодействия бурового инструмента с грунтом различных категорий трудности разработки. При проведении теоретических и экспериментальных исследований были использованы: аналитический метод с привлечением средств современной вычислительной техники, фундаментальные положения теоретической механики, теории прочности. Научная новизна работы заключается в теоретически и экспериментально подтвержденной методике выбора основных конструктивных параметров принципиально нового механизма поворотно-ударного действия (патент № 2232858 РФ) в зависимости от типов буровой коронки. Предложенная методика оценки прочностных характеристик элементов конструкции позволяет определить величину усилия неразрушения P конструкции механизма поворотно-ударного действия для обеспечения безопасного удара по основанию канавки в процессе работы бурового инструмента.

Ключевые слова: методика расчета, параметры, конструкция, механизм поворотно-ударного действия, прочность, взаимодействие с грунтом.

Введение. Из техники, применяемой для проходки скважин при добыче полезных ископаемых, шпуров при закладке взрывчатых веществ на взрывных работах, разработке скальных грунтов, видно, что машины и механизмы, используемые для этих целей по принципу действия, подразделяются на вращательные, ударно-вращательные, вращательно-ударные, ударные и комбинированные (пневмоударные, виброударные и т.п.) [1–4]. Механизмы ударного действия буровых машин отечественного производства, приведенные в указанных источниках литературы морально устарели и на производстве заменены машинами производства Китая, Германии, Канады и США.

Основными недостатками чисто ударного бурения является малая производительность и ограни-

ченность глубины. При ударно-вращательном бурении рабочий орган, внедрившись в грунт, образует выемку на поверхности грунта во время подъема снаряда, так как при повороте следующая выемка образуется под углом к первой. Процесс разрушения грунта механизмом поворотно-ударного действия поворот рабочего органа в грунте требует дополнительных усилий сдвига грунта. В механизме поворотно-ударного действия в начале будет происходить скол грунта и его диспергирование при повороте и, при правильном подборе отношение энергии, затрачиваемой на удар и выбор рационального угла поворота снаряда, значительно снизится энергоемкость процесса копания.

Сказанное выше из условий импортозамещения требует создания новых конструкций буровых

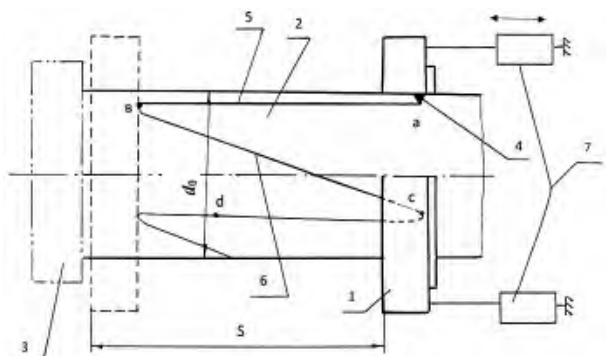


Рис. 1. Механизм ударно-поворотного действия [5]

механизмов. Разработанный авторами механизм поворотно-ударного бурения [5] может найти широкое применение в горнодобывающей и угольной промышленности, при выполнении ремонтных работ по содержанию дорог, при проходке шпуров и скважин в процессе добычи полезных ископаемых, а также в промышленном и гражданском строительстве. Также очевидно использование предлагаемой конструкции механизма поворотно-ударного действия и при выполнении военно-строительных работ.

Цель исследования. Разработка научно-обоснованной методики проведения теоретических исследований выбора и расчета рациональных параметров поворотной шайбы усовершенствованной конструкции предлагаемого механизма поворотно-ударного действия.

Основная часть. В предлагаемой конструкции механизма поворотно-ударного действия (рис. 1) [5] поворот штанги 2 (диаметр d_0) бурового станка осуществляется за счет перемещения по ней поворотной муфты 1, на внутренней части которой выполнен выступ 4 диаметром d , который свободно входит в вырезанные на поверхности штанги чередующиеся вертикальные 5 и наклонные канавки 6, которые сопряжены между собой дугообразными канавками. Очевидно, что для обеспечения работоспособности конструкции глубина канавок должна быть не менее длины высоты выступа 4, а их ширина — соответствовать диаметру d . Все канавки (вертикальные, наклонные и дугообразные) должны быть выполнены одной ширины и глубины. Перемещение поворотной муфты 1 по штанге 2 осуществляется за счет механизма передвижения 7 (гидроили пневмоцилиндров, реечного зацепления и т.п.).

При этом высота расположения всех канавок по верхнему и нижнему уровню штанги 2 диаметром d неизменна и равна длине хода S механизма 7, обеспечивающего перемещение поворотной муфты 1.

Проведенные теоретические исследования показали, что изменения геометрических параметров механизма поворотно-ударного действия определяются изменением коэффициента трения скольжения μ при перемещении выступа поворотной муфты по направляющей, диаметров муфты d_0 и выступа d , а также длины хода S механизма из условия исключения заклинивания при выбегании выступа с одного участка канавок на другой по зависимости:

$$\frac{d}{d_0} \operatorname{tg} \left(\arctg \frac{\pi d_0}{nS} + \arctg \mu \right) \leq 1. \quad (1)$$

Здесь n — число канавок.

При этом должно соблюдаться соотношение:

$$y = \sqrt{\frac{S}{d}} = \frac{4\mu\sqrt{n} \pm \sqrt{16\mu^2 n + 4\pi n}}{2n}. \quad (2)$$

После преобразований получаем

$$y = \left(2\mu + \sqrt{4\mu^2 + \pi} \right) \frac{2}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Ниже приведем алгоритм определения параметров механизма поворотно-ударного действия.

1. Задаем коэффициентом трения $\mu \in [0,03 \dots 0,09]$.

2. Определяем соотношение между длиной хода поворотной шайбы S , числом канавок n и диаметром выступа d по зависимости (3).

3. Определяем диаметр штока d_0 по формуле из условия, что величина $y = nS$ по формуле

$$d_0 = \frac{(y - \pi) - \sqrt{(y - \pi)^2 - 16\mu^2}}{2\pi\mu}. \quad (4)$$

4. Определяем диаметр выступа по формуле:

$$d = d_0 \frac{(y - \pi) - \sqrt{(y - \pi)^2 - 16\mu^2}}{2\mu}. \quad (5)$$

5. Определяем произведение nS

$$nS = dy.$$

6. Определим угол наклона канавок (рис. 1) по зависимости

$$\alpha = \arctg \frac{\pi d_0}{nS}. \quad (6)$$

7. Определим угол поворота штанги φ

$$\varphi = \arctg \frac{1}{\mu}. \quad (7)$$

Предлагаемый алгоритм определения геометрических параметров механизма поворотно-ударного действия позволяет широко использовать вычислительную технику.

Для выбора углов поворота штанги φ в зависимости от коэффициента трения μ построена номограмма (рис. 2).

Учитывая, что число зубьев N на коронке бура равно трем или пяти [1–4, 6], оценим рациональное число канавок n , которое необходимо выполнить на направляющей штанге. Для этого воспользуемся геометрической интерпретацией взаимодействия рабочего органа с грунтом при ударе [7–11] (рис. 3), на котором показана связь числа зубьев коронки N с числом канавок n .

На рис. 3 окружностью изображен след буровой коронки, а нанесенные точки на этой окружности показывают положение зубьев коронки [7, 10, 12, 13] при взаимодействии рабочего органа бура с грунтом. Точкам «0» соответствует положение зубьев коронки в момент первого удара, далее точками «1», «2», ..., отмечены точки последующих ударов, происходящих при повороте штанги.

Очевидно, что при одном ударе расстояние S между соседними сколами будет равно:

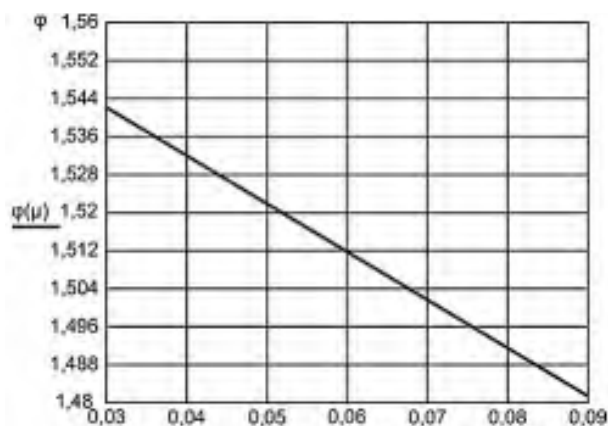


Рис. 2. Изменение угла поворота штанги φ в зависимости от коэффициента трения

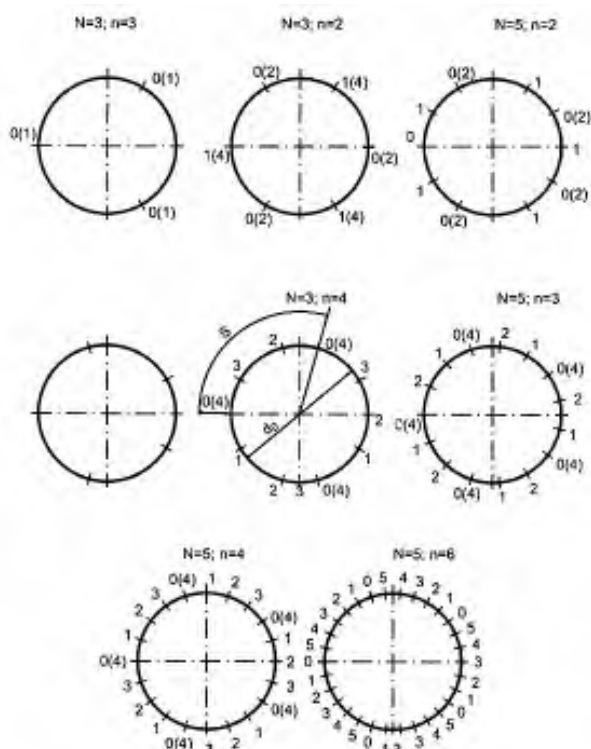


Рис. 3. Геометрическая интерпретация взаимодействия рабочего органа с грунтом при ударе

$$S = \frac{\pi d_0}{N}, \quad (8)$$

где N — число зубьев на коронке рабочего органа; d_0 — диаметр штанги, м.

Причем число канавок n соответствует частоте ударов бурового инструмента по грунту.

Рассмотрим процесс разрушения грунта коронками при повороте рабочего органа при различном числе зубьев на коронке. На рис. 3 видно, что изготовление одной канавки нецелесообразно при любом числе зубьев, так как при повороте рабочего органа точки нанесения ударов зубьями будут совпадать. (Здесь под одной канавкой понимается возможность одного поворота направляющей штанги.)

Рассмотрим процесс разрушения грунта коронкой, снабженной тремя зубьями (рис. 3а, в, д), т.е. $N = 3$.

Очевидно, что под одной вертикальной канавкой, выполненной на штанге, понимается возможность нанесения одного удара по грунту и последующего поворота штанги на угол φ . Таким образом, видно, что выполнение на штанге одной канавки нецелесообразно, так как точки ударов, нанесенные зубьями, будут накладываться друг на друга. При наличии двух канавок (рис. 3а) попадание зубьев в определенные точки грунта будут дублироваться через 2 удара. Наличие трех канавок при трех зубьях (рис. 3в) нерационально, так как удары при поворотах буровой штанги будут приходиться в одни и те же точки разрабатываемой поверхности, т.е. будут накладываться друг на друга, что нецелесообразно. При наличии четырех канавок повторный удар в исходную точку «0» будет происходить через 3 удара.

При наличии пяти зубьев при $N = 5$ (рис. 3г, д, е, ж, з).

При наличии числа зубьев на коронке, равного пяти и двум канавкам, повторный удар в точку «0» будет повторяться через один удар, при трех канавках — через два удара, при четырех — через три удара, при пяти — через ноль ударов, при шести — через 5 ударов.

Учитывая условия разрушения грунта сколом [8, 10, 13] видно, число канавок в свою очередь n зависит от расстояния скола $l = 2b$, т.е. расстояния между зубьями и соседними ударами, которое определим по зависимости. Здесь b — ширина одного зуба, м.

Для определения числа канавок рационально воспользоваться зависимостью:

$$n = \frac{S_0}{l} = \frac{\pi d_0}{Nl}.$$

С учетом зависимости, по которой определяется скол, число канавок будет равно:

$$n = \frac{\pi d_0}{2Nb}. \quad (9)$$

Исследование рационального изготовления числа канавок n в зависимости от диаметра бура d_0 и числа зубьев на нем N приведено в табл. 1.

В табл. 1 видно, что при увеличении диаметра буровой коронки число канавок должно увеличиваться, а при увеличении числа зубьев число канавок снижается.

Однако при наличии пяти зубьев на буровой коронке при ее диаметре менее 60 мм усовершенствование механизма ударного действия предлагаемым способом нецелесообразно, что было обосновано выше. Следовательно, наличие пяти зубьев не требует поворота рабочего органа при прокладке шпуров диаметром до 50 мм и число канавок должно быть не более четырех.

Таким образом, при частоте ударов 2 Гц разрушение (скол) грунта будет происходить за 2...4 поворота поворотной штанги бурового инструмента по кольцевой поверхности.

Проведенные теоретические исследования позволили определить рациональное размещение канавок на штанге и найти функциональные зависимости между геометрическими параметрами бурового инструмента, а также связь этих параметров с усилиями ударов в нижних (верхних) точках канавок, выполненных на штанге.

Таблица 1

Рекомендуемое число канавок l на штанге *) в зависимости от диаметра бура d_0 и числа зубьев на нем N

Число зубьев, N	Диаметр буровой коронки, d_0 , мм				
	40	60	80	100	120
3	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2
5	0,84	1,26	1,68	2,1	3,52

*) Полученные значения округляем до ближайшего целого значения из стандартного ряда целых чисел

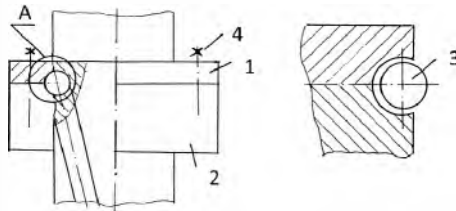


Рис. 4. Конструкция поворотной шайбы механизма поворотно-ударного действия

Рассмотрим конструкцию поворотной шайбы механизма поворотно-ударного действия, выполненную с выступом и предполагаемую технологию ее изготовления. Учитывая значительные нагрузки, приходящиеся на выступ, очевидно, что он будет подвергаться не только интенсивному изнашиванию, но и деформациям (смятию) в процессе эксплуатации, что требует его периодической замены. Если выступ выполнить заодно с шайбой, как единое целое, то износ выступа приведет к замене всей шайбы. Это, в свою очередь, связано со значительными материальными затратами. Поэтому поворотную шайбу предлагается выполнять в виде сборочной единицы (рис. 4).

Предлагаемая конструкция поворотной шайбы включает в себя корпус 1, соединенный с крышкой 2 посредством крепежных элементов (шпилек) 4. В специальную проточку, выполненную совместно в корпусе 1 и крышке 2, вставляется выступ 3, имеющий возможность вращения относительно собственной центральной оси, что позволит снизить трение между выступом и поверхностью канавки, а следовательно, и срок службы шайбы.

Для изготовления конструкции механизма поворота воспользуемся предлагаемым выше алгоритмом.

Учитывая, что коэффициент трения покоя во многом определяется шероховатостью поверхности, в первую очередь при изготовлении поворотной шайбы зададимся, например, шероховатостью R_z 1,6. Величине этой шероховатости соответствует коэффициент трения $\mu = 0,35$.

Пусть частота ударов ν рабочего органа бура равна 2 Гц. Следовательно, на поверхности направляющей штанги необходимо в соответствии с зависимостями, предлагаемыми в алгоритме, выполнить две канавки, т.е. $N = 2$. При этом длина хода штока $S = 55$ мм.

Используя алгоритм для определения параметров модели механизма поворота, произведем вычисления параметров механизма поворотно-ударного действия предлагаемой конструкции.

$$y = 4 \cdot (2 \cdot 0,035 + \sqrt{4 \cdot 0,035 + 3,14})^2 = 14,15 ;$$

Таблица 2

Расчетные значения параметров модели механизма поворотно-ударного действия

Наименование	Обозначение	Ед. изм.	Значения	
			Расчетные	Уточнен.
Число канавок	l	—	2	
Диаметр штока	d_0	мм	57,32	
Угол наклона канавок	α	град	60,81	
Угол наклона перехода «выбег»	ϕ_1	град	88,00	
Коэффициент трения	μ	—	0,035	
Шероховатость	R_z	—	1,6	
Ход штока	S	мм	50	
Эксцентриситет	e	мм	5,7	
Ширина канавки	d	мм	71	

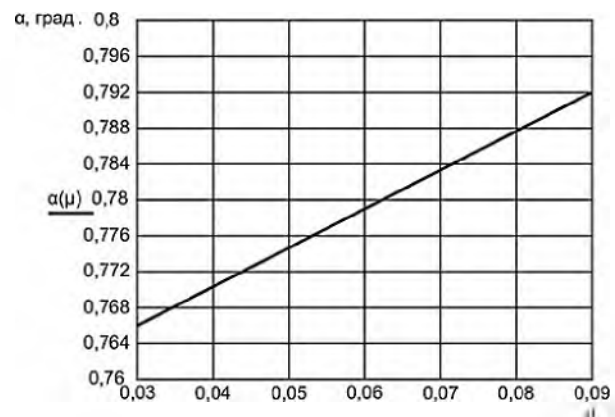


Рис. 5. Изменение угла наклона канавок α в зависимости от коэффициента трения

$$d_0 = \frac{-\sqrt{(14,15 - 3,14)^2 - 16 \cdot 14,05 \cdot 0,035^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,035} = 0,05732 = 57,32 \text{ мм};$$

$$d = \frac{2 \cdot 0,05}{14,15} = 0,071 \text{ мм};$$

$$\alpha = \arctg \frac{3,14 \cdot 0,05732}{2 \cdot 0,05} = \arctg 1,7898 = 60,81^\circ$$



Рис. 6. Модель механизма ударно-поворотного действия:
1 — шайба; 2 — штанга (справа показана штанга с канавками); 3 — направляющие канавки

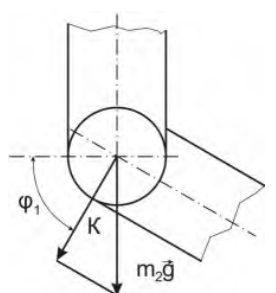


Рис. 7. Момент перехода с наклонного участка канавки на вертикальный участок

$$\varphi_1 = \arctg \frac{1}{\mu} = \arctg \frac{1}{0,035} = 88^\circ.$$

Расчетные значения занесем в табл. 2.

На рис. 5 приведен график, позволяющий выбирать коэффициент трения μ в зависимости от угла наклона канавок α и в соответствии с этим назначать шероховатость поверхности при обработке поверхностей канавки и выступа R_z .

На основании проведенных теоретических исследований по определению параметров механизма ударно-поворотного действия была изготовлена геометрически подобная модель (рис. 6), подтверждающая работоспособность данного предложения.

На рис. 7 приведен эскиз элемента канавки на поворотной штанге, находящейся в нижней точке при опускании по ней поворотной муфты.

Исследуем изменение нагрузки при опускании (подъеме) поворотной муфты в нижнюю (верхнюю) точку канавки в процессе перемещения по ней [14–16].

Очевидно, что в процессе работы удар будет происходить в точке К, которая является точкой контакта выступа с поверхностью основания канавки. При этом энергия удара будет равна:

$$(P + mg)h = \frac{mv^2}{2}, \quad (10)$$

где P — усилие на приводном механизме (гидроцилиндре, пневмомускулах и пр.), Н; m — масса на-

правляющей штанги, кг; h — высота падения направляющей шайбы (ход штока гидроцилиндра), м; v — скорость перемещения направляющей шайбы, м/с.

Удар в поставленной задаче будем рассматривать как результат контактирования в точках 1 и 2 (рис. 1).

Из условия перемещения муфты, участвующей в возвратно-поступательном движении, видно, что скорость тела (поворотной муфты) в точке 2 должна быть равна нулю. Это обусловлено тем, что скорость шайбы в этой точке была равна нулю, т.е. $P = 0$.

Закон сохранения энергии в точке К в рассматриваемых условиях будет иметь вид:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{\left(m_2 + \frac{P}{g}\right)v^2}{2} = \left(m + m_2 + \frac{P}{g}\right)\frac{v^2}{2}, \quad (11)$$

где v_k — скорость выступа шайбы (шайбы) в точке К.

Из зависимости (11) следует, что скорость тела в точке К будет равна:

$$v_k = v \sqrt{\frac{m}{m + m_2 + \frac{P}{g}}}. \quad (12)$$

Разделив полученное выражение на m , получим:

$$v_k = v \sqrt{\frac{m}{m + \frac{m_2}{m} + \frac{P}{mg}}}. \quad (13)$$

Исследуем полученное выше выражение (13). Очевидно, что масса $m_2 \ll m$ и величина $\frac{P}{g} \approx m$, тогда скорость перемещения выступа шайбы будет равна:

$$v_k = \frac{v}{\sqrt{2}}. \quad (14)$$

С другой стороны, величина усилия удара в точке К равна:

$$(P + m_2g)\sin\varphi_2.$$

Работу A удара в нижней (верхней) точках канавок определим по зависимости:

$$\frac{\left(m_2 + \frac{P}{g}\right)\sin\varphi_1(v_k \sin\varphi_1)^2}{2} = A,$$

откуда

$$A = \frac{\left(m_2 + \frac{P}{g}\right)\sin^3\varphi_1 v_k^2}{2}. \quad (15)$$

Величина работы, полученная по зависимости (15), не должна превышать величины ударной вязкости материала поворотной штанги a_n , т.е. в этом случае должно выполняться условие:

$$\frac{\left(m_2 + \frac{P}{g}\right) \sin^3 \varphi_1 v_k^2}{2} \leq [a_H] \quad (16)$$

Откуда

$$P \leq \frac{g[a_H]}{v_k^2 \sin^3 \varphi_1} - m_2 g. \quad (17)$$

Из полученного выражения (17) определим величину усилия P , необходимого для обеспечения безопасного удара по основанию канавки в процессе работы бурового инструмента.

Заключение. На основании проведенных теоретических исследований предложена методика выбора геометрических параметров усовершенствованной конструкции механизма поворотного-ударного действия, обеспечивающих ее работоспособность, что было подтверждено при создании геометрически подобной модели. Предложенный алгоритм определения параметров механизма поворотного-ударного действия построен с учетом размеров существующих буровых штанг (диаметр d_0) и трения, возникающего между выступом и канавкой, что свидетельствует о незначительных затратах на модернизацию имеющихся в наличии буровых станков отечественного производства.

Выбор рационального числа вертикальных канавок на поверхности буровой штанги был проведен исходя из анализа состояния вопроса современных технических решений при выборе коронок буровых установок с рекомендуемым числом зубьев на основе процессов взаимодействия бурового инструмента с грунтом различных категорий трудности разработки. Предлагаемые номограммы позволяют проводить корреляцию числа канавок в зависимости от материалов на контактирующих в процессе работы элементов конструкции механизма ударно-поворотного действия.

Предложенная конструкция поворотной шайбы отличается хорошими эксплуатационными характеристиками благодаря быстрой замене выступа, перемещающегося по канавкам.

При проведении теоретических исследований предложена методика оценки прочностных характеристик элементов конструкции, позволяющая определить величину усилия неразрушения P конструкции механизма поворотного-ударного действия для обеспечения безопасного удара по основанию канавки в процессе работы бурового инструмента.

Очевидно, что методика расчета параметров механизма поворотного-ударного бурения существенно отличается от методик расчета, предлагаемых в работах [17] и [18], исходя из особенностей принятого конструктивного решения.

Список источников

1. Анисимов В. С., Макушкин Д. О., Каган И. А. Самоходные буровые-крановые машины. Москва: Высшая школа, 1982. 208 с.
2. Дмитриев Н. В., Зуйков А. И., Герасимов В. А. Горные и взрывные работы в энергетическом строительстве. Москва: Недра, 1992. 287 с. ISBN 5-247-02717-5.
3. Исследование машин для свайных и буровых работ: сб. науч. тр. / ВНИИ Транспортного строительства; Под ред. А. С. Головачева. Москва: Транспорт, 1987. 151 с.
4. Растегаев И. К. Машины для вечномерзлых грунтов. Москва: Машиностроение, 1986. 216 с.

5. Пат. 2232858 Российская Федерация, МПК E21B 1/12. Механизм ударного действия / Сладкова Л. А., Петров А. Н., Артюх Н. В., Сладков В. А., Петров В. А., Федосеев В. В. № 2002128948; заявл. от 29.10.2002; опубл. 20.07.2004, Бюл. № 20.

6. Чеченков М. С. Современные способы разработки прочных грунтов. Ленинград: Стройиздат, 1980. 125 с.

7. Растегаев И. К. Технология и механизация работ по строительству свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах. Ленинград: Стройиздат, 1980. 128 с.

8. Жуков И. А. Научно-методические основы определения физико-механических свойств горной породы при исследовании разрушения хрупких сред ударом // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. ст. Новокузнецк, Сиб. гос. индустр. ун-т, 2009. С. 96–100.

9. Доброборский Б. С. Теоретический анализ работы ударного механизма пневматического молотка системы «корпус-ударник» // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. EDN: STRNBB. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13930> (дата обращения: 23.09.2024).

10. Зеленин А. Н., Баловнев В. И., Керов И. П. Машины для земляных работ. Москва: Машиностроение, 1975. 423 с.

11. Недорезов И. А. Прогрессивные методы разработки мерзлых грунтов. Москва: Транспорт, 1969. 45 с.

12. Кахимов Б. А., Самохин М. С. Режущий буровой инструмент (расчет и проектирование). Москва: Машиностроение, 1976. 168 с.

13. Алексеева Т. В., Артемьев К. Дорожные машины. Часть 1. Машины для земляных работ. Москва: Машиностроение, 1972. 504 с.

14. Иванов М. Н. Детали машин. Москва: Высшая школа, 1991. 385 с.

15. Справочник машиностроителя / под ред. Н. С. Ачеркана. В 6 т. Москва: Машгиз, 1963. Т. 1. 592 с.

16. Енохович А. С. Справочник по физике и технике. Москва: Просвещение, 1989. 224 с.

17. Скларова А. А. Исследование влияния конструктивных параметров на область рационального применения машины горизонтально направленного бурения в заданной системе ограничений // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 24. С. 68–73. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-68-73. EDN: YOQVOG.

18. Мартюченко И. Г., Зенин М. И. Взаимодействие винтовой лопасти бурового инструмента с мерзлым грунтом // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 2 (72). С. 162–171. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171. EDN: BNAWTO.

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

СКРИПНИКОВ Дмитрий Иванович, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» РУТ, г. Москва.

Адрес для переписки: dimaskrip@mail.ru

Для цитирования

Сладкова Л. А., Скрипников Д. И. Методика расчета параметров механизма поворотного-ударного действия // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-5-12. EDN: VLVDAR.

Статья поступила в редакцию 23.09.2024 г.

© Л. А. Сладкова, Д. И. Скрипников

METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF THE ROTARY-IMPACT MECHANISM

Modern rotary-impact mechanisms for the destruction of solid and frozen soils have a bulky and complex design. The development of a method for improving the rotary-impact mechanism construction allows solving the problem of reducing the energy intensity of the soil destruction process. The algorithm of the geometrical parameters determination of the rotary-impact mechanism is scientifically substantiated on the basis of the modern technical solutions' analysis of drilling rigs and physical bases of the drilling tool interaction with the soils of various difficulty categories. An analytical method with the use of modern computer technology, fundamental provisions of theoretical mechanics and strength theory are applied in theoretical and experimental research. The scientific innovation of the research involves a theoretically and experimentally verified method of basic engineering parameters selection for a fundamentally new rotary-impact mechanism (patent No. 2232858 of the Russian Federation) depending on the drill bit types. The proposed method for evaluating the resistance features of structural elements allows determining the P value of the non-destruction force to provide a safe impact on the groove base during drilling tool operations.

Keywords: calculation method, parameters, structure, rotary-impact mechanism, strength, soil interaction.

References

1. Anisimov V. S., Makushkin D. O., Kagan I. L. Samokhodnyye buril'no-kranovyye mashiny [Self-propelled drilling and crane machines]. Moscow, 1982. 208 p. (In Russ.).
2. Dmitriyev N. V., Zuykov A. I., Gerasimov V. A. Gornyye i vzryvnyye raboty v energeticheskom stroitel'stve [Mining and blasting works in energy construction]. Moscow, 1992. 287 p. (In Russ.).
3. Issledovaniye mashin dlya svaynykh i burovnykh rabot [Research of machines for piling and drilling operations] / Ed. by A. S. Golovachev. Moscow, 1987. 151 p. (In Russ.).
4. Rastegayev I. K. Mashiny dlya vechnomerzlykh gruntov [Machines for permafrost soils]. Moscow, 1986. 216 p. (In Russ.).
5. Patent 2232858 Russian Federation, IPC E21B 1/12. Mekhanizm udarnogo deystviya [Percussion mechanism] / Sladkova L. A., Petrov A. N., Artyukh N. V., Sladkov V. A., Petrov V. A., Fedoseyev V. V. No. 2002128948. (In Russ.).
6. Chechenkov M. S. Sovremennyye sposoby razrabotki prochnykh gruntov [Modern methods of strong soil excavation]. Leningrad, 1980. 125 p. (In Russ.).
7. Rastegayev I. K. Tekhnologiya i mekhanizatsiya rabot po stroitel'stvu svaynykh fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh [Technology and mechanisation of construction of pile foundations on permafrost soils]. Leningrad, 1980. 128 p. (In Russ.).
8. Zhukov I. A. Nauchno-metodicheskiye osnovy opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornoy porody pri issledovanii razrusheniya khрупkikh sred udarom [Scientific and methodological basis for determining physical and mechanical properties of rocks in the investigation of brittle fracture by impact]. Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov. *Science-Intensive Technologies for the Development and Use of Mineral Resources*. Novokuznetsk, 2009. P. 96–100. (In Russ.).
9. Dobroborskiy B. S. Teoreticheskiy analiz raboty udarnogo mekhanizma pnevmaticheskogo molotka sistemy «korpus-udarnik» [Theoretical analysis of a pneumatic hammer impact mechanism of the «body-drummer»]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. *Modern Problems of Science and Education*. 2014. No. 4. EDN: STRNBB. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13930> (accessed: 25.09.2024). (In Russ.).
10. Zelenin A. N., Balovnev V. I., Kerov I. P. Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Earthmoving machines]. Moscow, 1975. 423 p. (In Russ.).
11. Nedorezov I. A. Progressivnyye metody razrabotki merzlykh gruntov [Progressive methods of frozen ground extraction]. Moscow, 1969. 45 p. (In Russ.).
12. Kakhimov B. A., Samokhin M. S. Rezhushchiy burovoy instrument (Raschet i proyektirovaniye) [Cutting drilling tools (calculation and engineering)]. Moscow, 1976. 168 p. (In Russ.).
13. Alekseyeva T. V., Artem'yev K. Dorozhnyye mashiny. Chast' 1. Mashiny dlya zemlyanykh rabot [Road machines. Part 1. Earthmoving machines]. Moscow, 1972. 504 p. (In Russ.).
14. Ivanov M. N. Detali mashin [Machine details]. Moscow, 1991. 385 p. (In Russ.).
15. Spravochnik mashinostroitel'ya [Mechanical engineering handbook] / Ed. by N. S. Acherkan. In 6 vols. Moscow, 1963. Vol. 1. 592 p. (In Russ.).
16. Yenkozhovich A. S. Spravochnik po fizike i tekhnike [Handbook of physics and technology]. Moscow, 1989. 224 p. (In Russ.).
17. Sklyarova A. A. Issledovaniye vliyaniya konstruktivnykh parametrov na oblast' ratsional'nogo primeneniya mashiny gorizontallyno napravlennoy bureniya v zadannoy sisteme ogranicheniy [Studying the influence of design parameters on the area of rational application of a horizontal directional drilling machine in a specified system of constraints]. Transportnoye, gornoye i stroitel'noye mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo.

Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. 2024. No. 24. P. 68–73. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-68-73. EDN: YOQVOG. (In Russ.).

18. Martyuchenko I. G., Zenin M. I. Vzaimodeystviye vintovoy lopasti burovogo instrumenta s merzlym gruntom [Interaction of a helical blade of a drilling tool with frozen ground]. *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. Vol. 17, no. 2 (72). P. 162–171. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-2-162-171. EDN: BNAWTO. (In Russ.).

SLADKOVA Lyubov Aleksandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the 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

SKRIPNIKOV Dmitriy Ivanovich, Graduate Student of the Ground Transportation and Technological Means Department, RUT, Moscow.

Correspondence address: dimaskrip@mail.ru

For citations

Sladkova L. A., Skripnikov D. I. Method for calculating the parameters of the rotary-impact mechanism. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-5-12. EDN: VLVDAR.

Received September 23, 2024.

© L. A. Sladkova, D. I. Skripnikov

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ MATHCAD

На основе графических исследований определена величина хода толкателя эксцентрикового механизма при эксцентриситете от 4 до 6 мм. Путем аппроксимации графиков хода толкателя по поверхности эксцентрика предложена расчетная формула, которая с достаточной для практики точностью определяет ход толкателя в зависимости от угла поворота вала с эксцентриком. Предложены формулы для определения скорости и ускорения толкателя эксцентрикового механизма. Относительная погрешность при определении хода толкателя графическим и расчетным способами не превышает 6 %. С применением программы Mathcad выполнен расчет и построены графики пути, скорости, ускорения толкателя эксцентрикового механизма с эксцентриситетом 4, 5 и 6 мм при частоте вращения вала 1000 мин⁻¹. Рассмотрено практическое применение эксцентриковых механизмов для систем питания двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: эксцентрик, эксцентриситет, программа Mathcad, ход толкателя, скорость толкателя, ускорение толкателя, применение эксцентриковых механизмов.

Введение. Эксцентрик (от лат. — «отделение от центра вращения»). Деталь типа диска, ось вращения которого сдвинута от основной (вертикальной) оси вращения вала на некоторое расстояние. Эксцентрики применяют для преобразования вращательного движения вала в поступательное движение толкателя, поршня или другой детали. Эксцентриситетом называют величину смещения на определенное расстояние (например, 6 мм) от центра вращения основной окружности главного вала, центра вращения дополнительной окружности.

Обсуждению различных вопросов, связанных с исследованием эксцентриковых механизмов, посвящены работы как отечественных, так и зарубежных учёных.

В работе P. Simionescu, I. Talpasanu авторами обсуждаются две формулировки кинематики эксцентриковой цепной тяги, применяемой в робототехнике, обработке материалов и манипуляциях, в одной из которых используются уравнения связи,

а в другой — векторный циклический подход. Авторы сравнивают формулировки с точки зрения показателей передачи движения, различий в построении кинематической цепи, в случае невозможности сборки, и времени процессора, необходимого для выполнения одного набора вычислений [1].

Анализ кинематики и динамики эксцентрикового кругового кулачкового механизма представлен в работе Li Jun Xie. Автор статьи для изучения кинематических и динамических параметров эксцентрикового кругового кулачкового механизма использует геометрические методы и механические принципы, а также приводит их формулы. Результаты исследования автора подтверждают его выводы о том, что линейная скорость и ускорение ведомого элемента, а также приводной момент являются функциями угла поворота и угловой скорости вращения кулачка [2].

Предложенные в работе авторов: L. Igumnov, V. Metrikin and I. Nikiforova «методы исследования динамических характеристик новых шатунных ме-

ханизмов кривошипно-шатунного типа, производимых на созданной авторами математической модели нового многоударного эксцентрикового ударно-вибрационного механизма, позволяют настроить эти механизмы на наиболее эффективный периодический режим работы и эффективно анализировать основные изменения в режимах их работы при изменении параметров системы» [3, с. 485].

В работе Р. М. Игнатищева «обоснованы, необходимые в проектировании, количественные соотношения между основными геометрическими и кинематическими величинами для синусоэксцентриковых передач» [4, с. 53].

П. Н. Сильченко (с соавт.) на основе анализа нагрузочной способности эксцентриковых подшипников качения показал «возможные варианты построения кинематических схем эксцентрикового подшипника качения и особенности распределения действующей радиальной нагрузки, приложенной к ведущему кольцу, по телам качения» [5, с. 13].

В научной статье Н. М. Селивончик, Н. Л. Нестеренко рассматривается противоугонное устройство для остановки угоняемых силой ветра грузоподъемных кранов, использующее клещевой захват, приводимый в действие эксцентриковым механизмом. Авторами «представлены расчеты эксцентрикового механизма, как одного из основополагающих механизмов противоугонного кранового устройства» [6, с. 113].

В статье М. Lustenkov (с соавт.) представлена конструкция и рассмотрен принцип действия планетарно-роликовой передачи с сателлитом, совершающим сферическое движение. Проведен сравнительный анализ передач эксцентрикового и сферического типов с одинаковыми кинематическими и сопоставимыми геометрическими параметрами. Критерием сравнения является кинетическая энергия. Были получены зависимости для определения кинетической энергии для обоих типов зубчатых колес от передаточного числа, угловой скорости ведущего звена и геометрических параметров [7].

Исследование А. R. Strelkov, O. V. Tsabilev и М. А. Gridneva посвящено уникальной технологии мембранного разделения VSEP (Vibratory Shear Enhanced Process), сводящей к минимуму негативные последствия концентрационной поляризации. Расположенные на противовесах эксцентриковые механизмы своим вращением инициируют вибрацию уравнивающих пластин, а затем через торсионы колебания передаются на мембранные корпуса с заданной амплитудой и частотой [8].

Цель данной работы заключается в определении графическим и расчётным путем хода толкателя в зависимости от угла поворота и частоты вращения вала эксцентрика. Основная задача исследования — по анализу графика зависимости хода толкателя от угла поворота вала с эксцентриками различной величины определить путь, скорость и ускорение толкателя с применением аппарата дифференциального исчисления и программы Mathcad. Данные зависимости необходимы для осуществления расчета основных параметров эксцентриковых механизмов, включая расчеты на прочность, надежность и долговечность.

В работе [9] кинематическое исследование механизмов (кулачков, эксцентриков) предложено выполнять расчетным путем и графическим методом, с помощью построения диаграмм пути, скорости и ускорения толкателя.

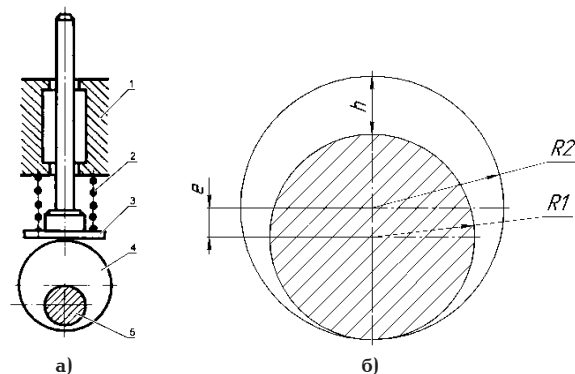


Рис. 1. Эксцентриковый механизм (а):
1 — корпус; 2 — пружина; 3 — плоский толкатель;
4 — эксцентрик;
5 — вал; разрез эксцентрикового вала (б)

Графическое определение хода толкателя эксцентрикового механизма. На рис. 1 изображен эксцентриковый механизм для перемещения толкателя (а) и эксцентрик (б) с радиусом вала $R_1 = 16$ мм, радиусом эксцентрика $R_2 = 22$ мм, эксцентриситетом $e = 6$ мм.

Графическое определение хода толкателя начинаем с построения профиля вала и эксцентрика с учетом размеров, указанных выше. Радиусом $R_1 = 16$ мм выполняем окружность вала с необходимым разрезом. От центра вала по вертикальной оси откладываем эксцентрисит $e = 6$ мм. Из нового центра проводим окружность радиусом $R_2 = (R_1 + e) = 22$ мм. Максимальный подъем толкателя в этом случае будет равен 12 мм.

Для расчёта скорости и ускорения толкателя, примем число оборотов вала в минуту (частоту) постоянным, равным 1000 мин^{-1} . С целью уменьшения погрешности, возникающей при определении хода толкателя графическим способом, разрез вала и вид эксцентрика выполняем в масштабе 5:1. Из центра вала через 10 градусов проводим прямые линии (лучи). Ход толкателя будет равен расстоянию от точки входа луча в окружность вала и выхода из окружности эксцентрика. Данные замеров вносим в табл. 1.

Графическое определение скорости толкателя. По формуле (1) определим время Δt (в секундах) при повороте вала на угол $\varphi = 10^\circ$ и числе оборотов вала эксцентрика в минуту $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, необходимое для кинематического расчёта толкателя (определения скорости и ускорения)

$$\Delta t = \frac{\varphi}{6 \cdot n} = \frac{10}{6 \cdot 1000} = 0,00166 \text{ с.} \quad (1)$$

По данным табл. 1 построен график пути (хода) толкателя (рис. 2).

Разделив приращение пути (величину Δh , м) на каждом участке разбиения на приращение аргумента $\Delta t = 0,00166 \text{ с}$, получим соответствующее значение средней скорости толкателя $\dot{q}_{\text{ср}}$ (м/с) при повороте вала эксцентрика от 0 до 180° в интервале через 10° . Занесем в табл. 1 результаты полученных вычислений.

Анализ результатов вычислений, представленных в табл. 1, показывает, что значение средней скорости достигает своего максимума в интервале изменения угла поворота вала эксцентрика от 90° до 100° :

Таблица 1

Зависимость хода и скорости толкателя
от угла поворота вала эксцентрика

$\varphi, ^\circ$	Ход толкателя h , мм	Приращение хода толкателя (функции) Δh , м	Скорость толкателя $\Delta \theta$, м/с
0	0	0	0
10	0,1	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,06
20	0,3	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,12
30	0,6	$0,3 \cdot 10^{-3}$	0,18
40	1,0	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,24
50	1,6	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0,36
60	2,4	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,48
70	3,3	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,54
80	4,2	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,54
90	5,2	$1 \cdot 10^{-3}$	0,6
100	6,3	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,66
110	7,4	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,66
120	8,4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,6
130	9,25	$0,85 \cdot 10^{-3}$	0,5
140	10,0	$0,75 \cdot 10^{-3}$	0,44
150	10,6	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0,35
160	11,4	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,25
170	11,8	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,06
180	12,0	0	0

$$\Delta h = 6,3 - 5,2 = 1,1 \text{ мм} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$\Delta t = 0,00166 \text{ с},$$

тогда

$$\theta_{\text{cp}} = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{1,1 \cdot 10^{-3}}{0,00166} = 0,66 \text{ м/с}. \quad (2)$$

На рис. 3 представлен фрагмент графической интерпретации производимых расчётов по формуле (2) на каждом участке разбиения при повороте вала эксцентрика. С точки зрения геометрического смысла выполняемых действий, в рассматриваемом прямоугольном треугольнике (рис. 3) отношение $\Delta h / \Delta t$ численно (обозначается $\left\{ \frac{\Delta h}{\Delta t} \right\}$) равно тангенсу угла α [10, 11]. Например, на участке изменения угла φ от 30° до 40° , изображённом на рис. 3,

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \left\{ \frac{\Delta h}{\Delta t} \right\} = \{ \theta_{\text{cp}} \} = \frac{(1,0 - 0,6) \cdot 10^{-3}}{0,00166} = \\ &= \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,00166} = 0,24. \end{aligned} \quad (3)$$

Отношение приращения пути толкателя к приращению времени на каждом участке его изменения (Δt) выражает среднюю скорость толкателя (физический смысл производной). По данным табл. 1 может быть построен график изменения средней скорости движения толкателя. Расчетным способом можно определить ход поршня (толкателя), но для этого нужно иметь формулу для его нахождения.

При выполнении эскиза вала с эксцентриком графическим способом при радиусе вала 16 мм,

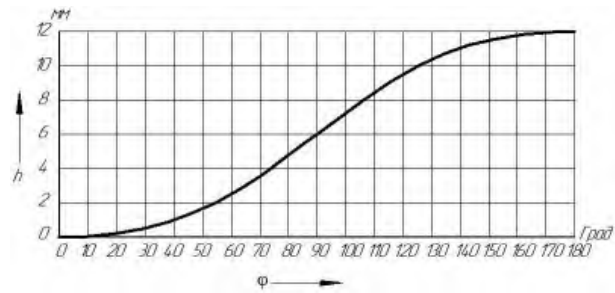


Рис. 2. График хода толкателя в зависимости от угла поворота вала эксцентрика (получен графическим путем)

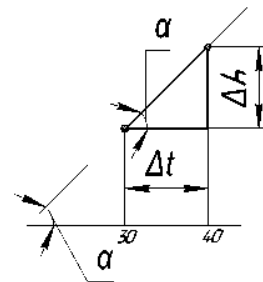


Рис. 3. Графическое определение средней скорости толкателя на участке

радиусе окружности эксцентрика 22 мм при эксцентриситете 6 мм установлено, что в точке 0° ($\cos 0^\circ = 1$) ход толкателя равен 0 мм, в точке 90° ($\cos 90^\circ = 0$) ход толкателя равен 6 мм (равен эксцентриситету), в точке 180° ($\cos 180^\circ = -1$) ход толкателя равен двум значениям эксцентриситета. Таким образом, в формулу для определения хода толкателя в зависимости от угла поворота вала эксцентрика должна входить тригонометрическая функция $\cos \varphi$, а также значение эксцентриситета. С достаточной для практики точностью, используя работу [10] и анализируя рис. 1 и 2, ход толкателя эксцентрикового вала можно определить расчетным путем по формуле

$$h = (R_2 - R_1) \cdot (1 - \cos \varphi) = e \cdot (1 - \cos \varphi). \quad (4)$$

На рис. 4 представлен график изменения хода толкателя, полученный расчетным путем с использованием формулы (4). Из анализа рис. 2 и 4 следует, что графическим и расчетным путем определен одинаковый максимальный ход толкателя, равный 12 мм ($h_{\text{max}} = 2e$). Используя формулу (4), можно определить скорость и ускорение толкателя (применяя производные) [10, 11].

Определив путь по формуле (4), находим скорость V и ускорение J толкателя, соответственно, как первую и вторую производные хода толкателя по времени [10, 11]

$$V = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \omega \frac{dh}{d\varphi}, \quad (5)$$

где $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ — угловая скорость вращения эксцентрикового вала в данный момент времени

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,6 \text{ 1/с}.$$

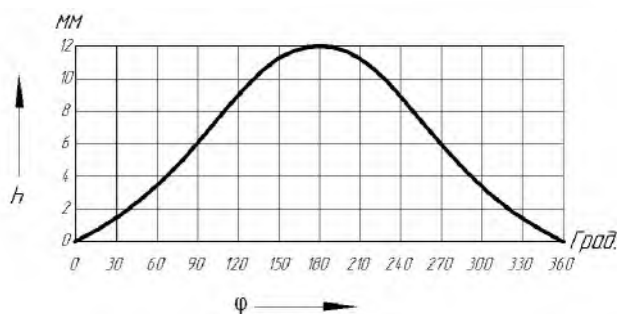


Рис. 4. График изменения хода толкателя при эксцентриситете вала 6 мм

Из формулы (5), используя основные правила дифференцирования применительно к выражению (4), получим

$$V = \omega \frac{dh}{d\varphi} = \omega \cdot (e \cdot (1 - \cos \varphi))'_{\varphi} = \omega \cdot e \cdot (0 - (-\sin \varphi)) = \omega \cdot e \cdot \sin \varphi. \quad (6)$$

Величина $e \cdot \omega = 0,006 \cdot 104,6 = 0,627$ м/с. При угле поворота вала эксцентрика φ равном 0° , 180° , 360° значение $\sin \varphi$ будет равно 0. В этих точках скорость толкателя будет равна 0 м/с. Максимальное значение скорости $V_{\max}$ будет при угле φ равном 90° и 270° (поскольку $\sin 90^\circ = 1$, $\sin 270^\circ = -1$). Значение $V_{\max}$ при этом будет равно 0,627 м/с и $(-0,627)$ м/с соответственно.

Ускорение толкателя определим аналогично скорости, взяв первую производную скорости по времени,

$$j = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{d\varphi} \cdot \omega,$$

$$j = \frac{dV}{d\varphi} \cdot \omega = \omega(e \cdot \omega \cdot \sin \varphi)'_{\varphi} = e \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi.$$

Таким образом,

$$j = e \cdot \omega^2 \cdot \cos \varphi. \quad (7)$$

Максимальное значение ускорения будет равно 65,6 м/с².

Кинематический расчёт эксцентрикового вала с применением программы (системы) Mathcad

Расчёт хода (пути) толкателя

Вводим обозначения эксцентриситетов [12, 13]

$e_6 := 6$ мм; $e_5 := 5$ мм; $e_4 := 4$ мм.

Для перевода радиан в градусы вводится множитель $\text{deg} := 0,017453$.

Проверка $\sin(30 \cdot \text{deg}) = 0,5$.

Уравнения хода толкателя для различных значений эксцентриситета:

$$h_6(\varphi) := e_6 \cdot (1 - \cos(\varphi \cdot \text{deg}));$$

$$h_5(\varphi) := e_5 \cdot (1 - \cos(\varphi \cdot \text{deg}));$$

$$h_4(\varphi) := e_4 \cdot (1 - \cos(\varphi \cdot \text{deg})).$$

Для вывода результатов расчёта хода толкателя (мм) в виде таблицы (рис. 5) с шагом 30° задаём массив углов: $\varphi := 0, 30 \dots 360$ (символ множества «...» вводится нажатием клавиши «;»).

$\varphi =$	$h_6(\varphi) =$	$h_5(\varphi) =$	$h_4(\varphi) =$
0	0	0	0
30	0.804	0.67	0.536
60	3	2.5	2
90	6	5	4
120	9	7.5	6
150	11.196	9.33	7.464
180	12	10	8
210	11.196	9.33	7.464
240	9	7.5	6
270	6	5	4
300	3	2.5	2
330	0.804	0.67	0.536
360	0	0	0

Рис. 5. Результаты расчета хода толкателя



Рис. 6. Графики хода толкателя для вала с эксцентриситетами 6 мм, 5 мм и 4 мм

Для улучшения вида кривой уменьшаем шаг расчёта (по умолчанию 1). $\varphi := 0 \dots 360$.

На рис. 6 приведены графики хода толкателя (выполнен с применением программы (системы) Mathcad). Верхний график соответствует пути толкателя при эксцентриситете 6 мм, средний — 5 мм, нижний — 4 мм.

Расчёт скорости толкателя

Задаём значения эксцентриситетов в метрах [12, 13]

$e_6 := 0,006$; $e_5 := 0,005$; $e_4 := 0,004$.

Частота вращения вала эксцентрика $n := 1000$ мин⁻¹.

Принимаем $\pi := 3,14$.

Угловая скорость вращения эксцентрикового вала

$$\omega := \frac{\pi \cdot n}{30} = 104,667 \text{ с}^{-1} \text{ (округляем 104,7)}$$

Скорость толкателя (м/с) для различных значений эксцентриситета определяем по формулам:

$$v_6(\varphi) := e_6 \cdot \omega \sin(\varphi \cdot \text{deg});$$

$$v_5(\varphi) := e_5 \cdot \omega \sin(\varphi \cdot \text{deg});$$

$$v_4(\varphi) := e_4 \cdot \omega \sin(\varphi \cdot \text{deg}).$$

Вывод значений скорости толкателя (м/с) через 30° (рис. 7). Задание диапазона с шагом 1 градус: $\varphi := 0 \dots 360$. Графики скорости толкателя представлены на рис. 8 для различных значений эксцентриситета (от 4 до 6 мм).

$\varphi =$	$v_6(\varphi) =$	$v_5(\varphi) =$	$v_4(\varphi) =$
0	0	0	0
30	0.314	0.262	0.209
60	0.544	0.453	0.363
90	0.628	0.523	0.419
120	0.544	0.453	0.363
150	0.314	0.262	0.209
180	0	0	0
210	-0.314	-0.262	-0.209
240	-0.544	-0.453	-0.363
270	-0.628	-0.523	-0.419
300	-0.544	-0.453	-0.363
330	-0.314	-0.262	-0.209
360	-0	-0	-0

Рис. 7. Результаты расчёта скорости толкателя

$\varphi =$	$j_6(\varphi) =$	$j_5(\varphi) =$	$j_4(\varphi) =$
0	65.731	54.776	43.82
30	56.925	47.437	37.95
60	32.866	27.389	21.911
90	0.002	0.001	0.001
120	-32.863	-27.386	-21.909
150	-56.923	-47.436	-37.949
180	-65.731	-54.776	-43.82
210	-56.926	-47.439	-37.951
240	-32.869	-27.391	-21.913
270	-0.005	-0.004	-0.003
300	32.86	27.384	21.907
330	56.921	47.434	37.948
360	65.731	54.776	43.82

Рис. 9. Результаты расчета ускорения толкателя

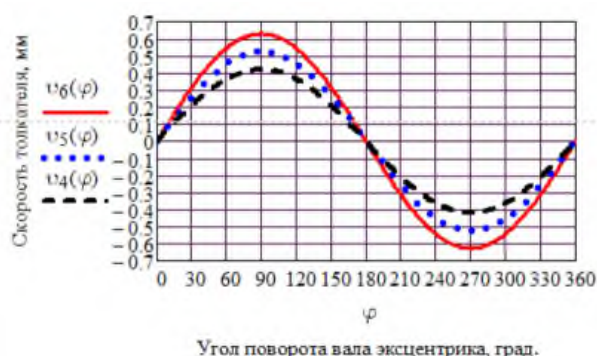
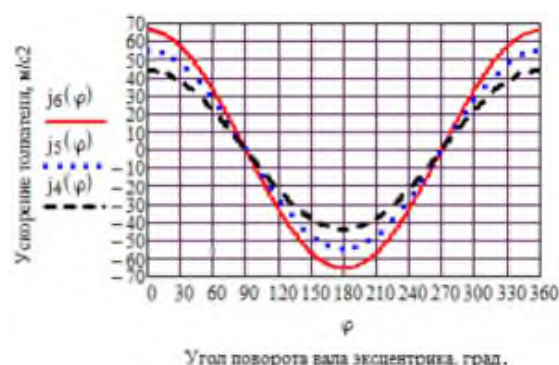
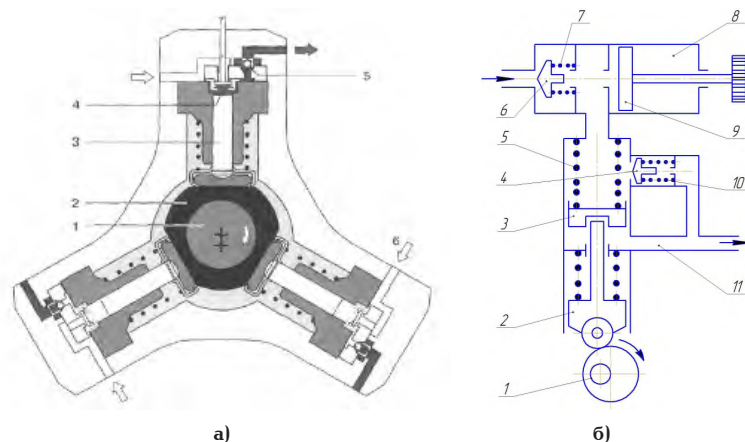
Рис. 8. Графики изменения скорости толкателя при $e_6 = 0,006$ м; $e_5 = 0,005$ м; $e_4 = 0,004$ мРис. 10. Графики ускорения толкателя при $e_6 = 0,006$ м; $e_5 = 0,005$ м; $e_4 = 0,004$ м

Рис. 11. Насос высокого давления (а): 1 — вал привода с эксцентриком; 2 — толкатель в виде втулки; 3 — насосный элемент с плунжером; 4 — впускной клапан; 5 — выпускной клапан; 6 — вход топлива; схема подкачивающего насоса (б): 1 — вал с эксцентриком; 2 — толкатель; 3 — главный поршень; 4 — нагнетательный клапан; 5 и 7 — пружины; 6 — впускной клапан; 8 — насос ручной прокачки; 9 — поршень; 10 — пружина; 11 — полость нагнетания

Расчёт ускорения толкателя

Ускорение толкателя (м/с^2) для различных значений эксцентриситета определяются по формулам [12, 13]

$$j_6(\varphi) := e_6 \cdot \omega^2 \cos(\varphi \cdot \text{deg});$$

$$j_5(\varphi) := e_5 \cdot \omega^2 \cos(\varphi \cdot \text{deg});$$

$$j_4(\varphi) := e_4 \cdot \omega^2 \cos(\varphi \cdot \text{deg}).$$

Вывод значений ускорения толкателя (м/с^2) через 30° (рис. 9). Задание диапазона с шагом 1° градус: $\varphi := 0 \dots 360$.

На рис. 10 представлены графики ускорения толкателя при различных эксцентриситетах.

Практическое применение эксцентриковых механизмов. Эксцентрики нашли широкое применение в насосах высокого давления [14]. На рис. 11а показан насос высокого давления с приводом плунжеров от вала с эксцентриком. Вал 1 выполнен

с эксцентриком, который перемещает втулку-толкатель 2. При вращении вала с эксцентриком 1 втулка-толкатель 2 поочередно перемещает плунжеры 3 в осевом направлении, сжимая топливо до давления 250 МПа. Впускной клапан 4 закрыт, а выпускной клапан 5 открыт (такт нагнетания топлива). Обратное движение плунжеров 3 происходит под действием пружин (такт впуска топлива).

Эксцентрикковые механизмы применяют для перемещения поршня подкачивающего насоса низкого давления. На рис. 11б приведена схема подкачивающего насоса, который под низким давлением 0,2–0,3 МПа подает топливо в полость головки насоса высокого давления.

При вращении вала с эксцентриком 1 толкатель 2 перемещает поршень 3 вверх, сжимая пружину 5, и выталкивает топливо через клапан 4 под поршень 3. При обратном движении толкателя 2 поршень 3 под действием усилия пружины 5 движется вниз, выталкивая топливо в канал 11, которое поступает в головку насоса высокого давления (клапан 4 закрыт). Ручной насос 8 служит для прокачки системы подачи топлива и удаления из неё воздуха.

Заключение

1. Экспериментальным и расчетным путем определено изменение хода толкателя эксцентриккового механизма с заданными размерами.

2. Предложено выражение, которое с достаточной для практики точностью определяет ход толкателя в зависимости от угла поворота вала с эксцентриком. Максимальный ход толкателя равен двум эксцентриситетам.

3. Предложены формулы для расчета скорости и ускорения толкателя.

4. С применением программы (системы) Mathcad выполнен кинематический расчет эксцентриккового механизма с эксцентриситетом, равным 4, 5, 6 мм, построены графики пути, скорости и ускорения толкателя.

5. Показано практическое применение эксцентрикков в системах подачи топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Список источников

1. Simionescu P., Talpasanu I. Kinematics of the eccentric RPRPR chain with applications to robotics, materials handling and manipulation // *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*. 2015. Vol. 2, no. 3–4. P. 314–340. DOI: 10.1504/IJMRS.2015.074109.
2. Xie Li Jun. Kinematics and Dynamics Analysis of Eccentric Circle Cam Mechanism. *Advanced Materials Research*. Vol. 821–822. P. 1466–1469. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.821-822.1466.
3. Igumnov A., Metrikin V., Nikiforova I. The dynamics of eccentric vibration mechanism (Part 1) // *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, no. 7. P. 4854–4865. DOI: 10.21595/jve.2017.18346.
4. Игнатищев Р. М. Основные результаты исследований для геометрических и кинематических расчётов синусоэксцентрикковых передач // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2010. № 1 (26). С. 53–60. DOI: 10.53078/20778481_2010_1_53. EDN: OITKNB.
5. Сильченко П. Н., Тимофеев Г. А., Меснянкин М. В. [и др.] Нагрузочная способность эксцентрикковых подшипников качения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. № 7 (724). С. 13–21. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-7-13-21. EDN: LGPPLX.
6. Селивончик Н. М., Нестеренко Н. А. Силовой расчет противоугольного кранового устройства из эксцентриккового и

клинового механизмов // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 2. С. 113–118. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-113-118.

7. Lustenkov M., Khalilov I., Moiseenko A. Comparative Analysis of Dynamic Characteristics of Spherical and Eccentric Transmissions with a Double-Ring Satellite // *Advances in Science and Technology*. 2024. Vol. 148. P. 103–110. DOI: 10.4028/p-msjjs7.

8. Strelkov A. R., Tsabilev O. V., Gridneva M. A. Vibratory Shear Enhanced Process Membrane Filtering Technology to Overcome the Negative Effects of Concentration Polarization // *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1088. P. 95–101. DOI: 10.4028/p-e4fh01.

9. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: учебник для вузов. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с. ISBN 5-02-013810-X.

10. Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Батраков П. А. Определение скорости и ускорения поршня с помощью производных // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2010. № 3 (17). С. 9–14. EDN: PBLZVL.

11. Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Рындин В. В. [и др.] Интегральное и дифференциальное исчисления в приложении к технике: моногр. / под ред. Ю. П. Макушева. Павлодар: Кереку, 2013. 330 с. ISBN 978-601-238-300-3.

12. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15. Санкт-Петербург: Питер, 2011. 400 с.

13. Рындин В. В., Волкова Л. Ю. Применение системы Mathcad при статистическом анализе экспериментальных данных // *Наука и техника Казахстана*. 2018. № 4. С. 6–17.

14. Файнлейб Б. Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: справочник. Ленинград: Машиностроение, 1990. 352 с.

МАКУШЕВ Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Автоматизация и энергетическое машиностроение» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск.

SPIN-код: 4777-2831

AuthorID (РИНЦ): 650763

AuthorID (SCOPUS): 57210975800

Адрес для переписки: makushev321@mail.ru

ПОЛЯКОВА Татьяна Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика и математика» СибАДИ; доцент кафедры «Прикладная математика и фундаментальная информатика» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4090-8339

AuthorID (РИНЦ): 652910

AuthorID (SCOPUS): 57287283100

ORCID: 0000-0002-9673-1750

Адрес для переписки: ta_polyakova@mail.ru

ВОЛКОВА Лариса Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика» Калининградского государственного технического университета, г. Калининград.

SPIN-код: 9822-6287

AuthorID (РИНЦ): 1013467

AuthorID (SCOPUS): 57210983249

ORCID: 0009-0008-1242-742X

Адрес для переписки: volkova0969@mail.ru

РЫНДИН Владимир Витальевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Механика и нефтегазовое дело» НАО «Торайгыров университет», г. Павлодар, Республика Казахстан.

SPIN-код: 1687-9720

AuthorID (РИНЦ): 929600

AuthorID (SCOPUS): 7007057327

Для цитирования

Макушев Ю. П., Полякова Т. А., Волкова Л. Ю., Рындин В. В.
Кинематический расчет эксцентриковых механизмов с ис-

Статья поступила в редакцию 02.07.2024 г.

© Ю. П. Макушев, Т. А. Полякова,
Л. Ю. Волкова, В. В. Рындин

UDC 621.43: 621.835.2
DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-13-20
EDN: TMGHHV

YU. P. MAKUSHEV¹
T. A. POLYAKOVA^{1,2}
L. YU. VOLKOVA³
V. V. RYNDIN⁴

¹Siberian State Automobile
and Highway University,
Omsk, Russia

²Omsk State Technical University,
Omsk, Russia

³Kaliningrad State
Technical University,
Kaliningrad, Russia

⁴Toraighyrov University,
Pavlodar, Republic of Kazakhstan

KINEMATIC CALCULATION OF ECCENTRIC MECHANISMS USING THE MATHCAD SOFTWARE

The article determines the value of the pusher stroke of the eccentric mechanism with the 4 to 6 mm eccentricity basing on graphic research. By approximating the graphs of the pusher stroke on the eccentric surface, the authors propose a calculation formula, which defines the pusher stroke as a function of the angle of the eccentric shaft rotation for practical purposes. Moreover, formulae for determining the velocity and acceleration of the eccentric mechanism pusher are offered. The relative error does not exceed 6 % in determining the pusher stroke by graphical and calculation methods. Calculations and graphs of path, velocity, acceleration of the eccentric mechanism pusher with eccentricity of 4, 5 and 6 mm at a shaft speed of 1000 min⁻¹ are calculated and plotted using Mathcad software. The practical implementation of eccentric mechanisms for power supply systems of internal combustion engines is considered.

Keywords: eccentric, eccentricity, Mathcad, pusher stroke, pusher velocity, pusher acceleration, implementation of eccentric mechanisms.

References

1. Simionescu P., Talpasanu I. Kinematics of the eccentric RPRPR chain with applications to robotics, materials handling and manipulation. *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*. 2015. Vol. 2, no. 3–4. P. 314–340. DOI: 10.1504/IJMRS.2015.074109. (In Engl.).
2. Xie Li Jun. Kinematics and Dynamics Analysis of Eccentric Circle Cam Mechanism. *Advanced Materials Research*. Vol. 821–822. P. 1466–1469. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.821-822.1466. (In Engl.).
3. Igumnov A., Metrikin V., Nikiforova I. The dynamics of eccentric vibration mechanism (Part 1). *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, no. 7. P. 4854–4865. DOI: 10.21595/jve.2017.18346. (In Engl.).

4. Ignatishchev R. M. Osnovnyye rezul'taty issledovaniy dlya geometricheskikh i kinematicheskikh raschetov sinusoekstsentrkovykh peredach [Main research results for geometric and kinematic calculations of sinusoexcentric gears]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2010. No. 1 (26). P. 53–60. DOI: 10.53078/20778481_2010_1_53. EDN: OITKHB. (In Russ.).
5. Sil'chenko P. N., Timofeyev G. A., Mesnyankin M. V. et al. Nagruzochnaya sposobnost' ekstsentrkovykh podshipnikov kacheniya [Load capacity of eccentric rolling bearings]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020. No. 7 (724). P. 13–21. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-7-13-21. EDN: LGPPLX. (In Russ.).
6. Selivonchik N. M., Nesterenko N. L. Silovoy raschet protivougonnogo kranovogo ustroystva iz ekstsentrkovogo i

klinovogo mekhanizmov [Power calculation of anti-driveaway crane device from eccentric and wedge mechanisms]. *Nauka i tekhnika. Science & Technique*. 2023. Vol. 22, no. 2. P. 113–118. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-2-113-118. (In Russ.).

7. Lustenkov M., Khalilov I., Moiseenko A. Comparative Analysis of Dynamic Characteristics of Spherical and Eccentric Transmissions with a Double-Ring Satellite. *Advances in Science and Technology*. 2024. Vol. 148. P. 103–110. DOI: 10.4028/p-msjjs7. (In Engl.).

8. Strelkov A. R., Tsabilev O. V., Gridneva M. A. Vibratory Shear Enhanced Process Membrane Filtering Technology to Overcome the Negative Effects of Concentration Polarization. *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1088. P. 95–101. DOI: 10.4028/p-e4fh01. (In Engl.).

9. Artobolevskiy I. I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow, 1988. 640 p. (In Russ.).

10. Makushev Yu. P., Polyakova T. A., Batrakov P. A. Opredeleyeniye skorosti i uskoreniya porshnya s pomoshch'yu proizvodnykh [Determination of piston velocity and acceleration using derivatives]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2010. No. 3 (17). P. 9–14. EDN: PBLZVL. (In Russ.).

11. Makushev Yu. P., Polyakova T. A., Ryndin V. V. [et al.]. Integral'noye i differentsial'noye ischisleniya v prilozhenii k tekhnike: monograph. [Integral and differential calculus in application to technology]. Pavlodar, 2013. 330 p. ISBN 978-601-238-300-3. (In Russ.).

12. Makarov E. G. *Inzhenernyye raschety v Mathcad 15*. [Engineering calculations in Mathcad 15]. Saint Petersburg, 2011. 400 p. (In Russ.).

13. Ryndin V. V., Volkova L. Yu. Primeneniye sistemy Mathcad pri statisticheskom analize eksperimental'nykh dannykh [Application of the Mathcad system in the statistical analysis of experimental data]. *Nauka i tekhnika Kazakhstana. Science and Technology of Kazakhstan*. 2018. No. 4. P. 6–17. (In Russ.).

14. Faynleyb B. N. *Toplivnaya apparatura avtotraktornykh dizeley: spravochnik*. [Fuel equipment of automotive diesel engines]. Leningrad, 1990. 352 p. (In Russ.).

MAKUSHEV Yuri Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Automation and Power Engineering Department,

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk.

SPIN-code: 4777-2831

AuthorID (RSCI): 650763

AuthorID (SCOPUS): 57210975800

Correspondence address: makushev321@mail.ru

POLYAKOVA Tatiana Anatolyevna, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Physics and Mathematics Department, SibADI; Associate Professor of the Applied Mathematics and Fundamental Computer Science Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4090-8339

AuthorID (RSCI): 652910

AuthorID (SCOPUS): 57287283100

ORCID: 0000-0002-9673-1750

Correspondence address: ta_polyakova@mail.ru

VOLKOVA Larisa Yurievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Energy Industry Department, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad.

SPIN-code: 9822-6287

AuthorID (RSCI): 1013467

AuthorID (SCOPUS): 57210983249

ORCID: 0009-0008-1242-742X

Correspondence address: volkova0969@mail.ru

RYNDIN Vladimir Vitalievich, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Mechanics, Oil and Gas Engineering Department, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan.

SPIN-code: 1687-9720

AuthorID (RSCI): 929600

AuthorID (SCOPUS): 7007057327

ORCID: 0000-0002-4248-9516

Correspondence address: rvladvit@yandex.kz

For citations

Makushev Yu. P., Polyakova T. A., Volkova L. Yu., Ryndin V. V. Kinematic calculation of eccentric mechanisms using the Mathcad software. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 13–20. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-13-20. EDN: TMGHHV.

Received July 02, 2024.

© Yu. P. Makushev, T. A. Polyakova, L. Yu. Volkova, V. V. Ryndin

Московский государственный
технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный
исследовательский университет),
г. Москва

РАЗРАБОТКА ЭТАПОВ ОЦЕНКИ ТРУДОЕМКОСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Для обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции предприятиям требуется осуществлять научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую деятельность. Подобного рода работы имеют целый ряд особенностей, в значительной степени осложняющих процесс оценки трудоемкости. Существующие методы нормирования труда, которые могут быть применимы для оценки трудоемкости, не в полной мере адаптированы для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Поэтому целесообразно разработать этапы оценки трудоемкости специально для данных работ, которые позволяли бы учитывать все их специфические факторы.

Ключевые слова: НИОКР, научно-исследовательская работа, опытно-конструкторская работа, трудоемкость, планирование, нормативы.

Введение. В настоящее время можно наблюдать значимый рост и повышение популярности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Данный тренд указывает на возрастающее признание важности научно-исследовательской деятельности в современном мире, где инновации и технологический прогресс играют ключевую роль в социально-экономическом развитии.

Увеличение объемов финансирования НИОКР свидетельствует о растущем инвестиционном интересе со стороны государственного и частного секторов, что подчеркивает стратегическую значимость научных исследований и разработок для достижения конкурентных преимуществ на международном уровне. Рост числа сотрудников, занятых в НИОКР, отражает не только расширение научной деятельности, но и повышение привлекательности карьеры в научно-исследовательской сфере, что способствует притоку высококвалифицированных специалистов и инновационных идей.

Кроме того, увеличение числа организаций, занимающихся НИОКР, подтверждает диверсификацию научных исследований и разработок, что способствует расширению исследовательского потенциала. Это, в свою очередь, усиливает интеграцию науки в различные аспекты общественной жизни и способствует более широкому распространению научных знаний и технологий.

В целом наблюдаемые тенденции свидетельствуют о том, что НИОКР становятся все более востребованными, что, несомненно, способствует про-

движению научного прогресса и технологического развития на глобальном уровне. Это подчеркивает важность дальнейшей поддержки и стимулирования научно-исследовательской деятельности как ключевого фактора устойчивого развития и благополучия общества.

С ростом числа проводимых НИОКР и объемов вложенных в них средств возникла потребность в нормировании научного труда, измерении его затрат и оценке трудоемкости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [1]. Определение трудоемкости НИОКР позволяет выстраивать планирование комплекса научно-технической подготовки производства, контролировать сроки выполнения и следить за освоением бюджетных средств [2]. Особенно это актуально, когда заказчик является государственным и органы государственной власти осуществляют контроль над расходованием средств, выделенных из соответствующих бюджетов или внебюджетных фондов.

Основная часть. Процесс определения трудоемкости НИОКР в значительной мере осложняется рядом особенностей, характерных для исследований и разработок [3].

1. Значительная часть работы связана с творческой деятельностью, которая направлена на внедрение в производство с целью повышения его эффективности. Это достигается посредством использования более современных технических решений, разработки новых технологических процессов и совершенствования организационных подходов [4]. Научно-исследовательская деятельность пред-

Подходы нормирования труда применимо к оценке трудоемкости НИОКР

Подходы	Методы	Сущность	Недостатки
Аналитический	Аналитические исследовательские	Анализ данных о трудовых процессах путем непосредственного наблюдения [8].	Необходимо большое количество информации. Сложность и громоздкость расчетов. Неполнота системы нормативных материалов в области НИОКР. Больше подходят для повторяющихся работ, которых в НИОКР меньшинство.
	Аналитические расчетные	Расчет трудоемкости на основе нормативов времени на отдельные рабочие операции, разработанных на основе хронометражных наблюдений [8].	
Экспертный	Метод комиссий	Свободный обмен мнениями между экспертами и выработка обобщенного мнения [9].	Влияние человеческого фактора. Риск недостаточной компетентности экспертов. Гипотетичность результатов оценки [10].
	Метод управляемой генерации идей	Обмен мнениями под надзором руководителя, направляющего генерацию идей [9].	
	Метод сценариев	Составление условных сценариев развития событий в разрезе как минимум двух направлений: оптимистического и пессимистического [9].	
	«Дельфи»	Анонимный опрос группы экспертов с последующими раундами обратной связи для достижения консенсуса по исследуемой проблеме [9].	
Суммарный	Опытный	Специалисты устанавливают стандарты, опираясь на свой личный опыт [11].	Необходимость наличия большого количества информации и данных за длительный период времени. Сложность получения необходимых данных для анализа.
	Статистический	Рассчитываются средние реальные затраты труда на аналогичные работы в прошлом [11].	
	Метод аналогий	Временные затраты сопоставляются с существующими аналогами [11].	
	Производные методы	В соответствии с требованиями к ожидаемым НР и требуемыми для них этапами НИОКР используются определенные стандартные коэффициенты увеличения трудоемкости (КУТР), которые увеличивают нормативную величину трудоемкости [12].	

ставляет собой процесс, обладающий уникальными характеристиками, которые отличают его от других видов трудовой деятельности. Этот процесс требует высокой интенсивности мыслительной работы, не ограниченной строгими рамками, а также развитых аналитических способностей. Он предполагает наличие таланта к поиску новых научных знаний, сосредоточенности и повышенной эмоциональной нагрузки. Творческий аспект научного труда делает результаты таких исследований непредсказуемыми, а сам процесс — слабо поддающимся формализации [5].

2. Новизна и оригинальность являются обязательными критериями научной работы. Если итогом деятельности становятся известные или проверенные результаты, такую работу нельзя считать научной. Именно поэтому результаты труда ученого существенно отличаются не только от работы представителей промышленности или строительства, но и от достижений других исследователей [4]. Новизна и оригинальность являются ключевыми особенностями научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Эти характеристики

отличают НИОКР от традиционной производственной деятельности, подчёркивая особенность подходов, методов и решений, применяемых в процессе создания новых продуктов, технологий или знаний.

3. Уникальность и неповторимость. В отличие от налаженного процесса производства, который является, как правило, массовым или серийным, хорошо поставленная исследовательская работа всегда уникальна [4]. Научно-исследовательский труд отличается тем, что его результаты далеко не всегда предсказуемы. Часто ожидания могут оправдаться лишь частично или вовсе не подтвердиться, что особенно характерно для фундаментальных исследований. Кроме того, значительная часть научных достижений может так и не найти практического применения или быть использована лишь кратковременно и эпизодически [5].

4. Вероятностный характер и риск. Неопределенность является неотъемлемой частью научных исследований, поскольку невозможно заранее предсказать, завершатся ли они успешно. На различных стадиях выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ возникает



Рис. 1. Классификация НИОКР

множество рисков. Среди основных можно выделить вероятность получения нежелательных результатов, которая может быть обусловлена некорректной интерпретацией данных, ошибочным выбором направления фундаментальных исследований, служащих основой для НИОКР, невозможностью реализации полученных результатов на текущем этапе их разработки, а также ошибками в расчетах и недостаточной глубиной проработки. Существует также риск несоблюдения установленных сроков, обусловленный неверной оценкой времени и ресурсов, необходимых для завершения работ. Риск отказа в сертификации продукта может быть вызван несоответствием установленным стандартам, нарушением условий секретности или отсутствием требуемых лицензий. Отдельно стоит отметить угрозу создания результата, не подлежащего патентованию, например, из-за наличия аналогов или несоответствия патентным требованиям. Кроме того, риск несвоевременного патентования может существенно повлиять на конкурентоспособность: преждевременное патентование, не сопровождаемое защитой рынка, может нанести серьезный ущерб, а чрезмерная задержка с патентованием может привести к тому, что аналогичная разработка будет запатентована сторонними разработчиками [6].

5. Отсутствие общепринятых типовых норм. В общепринятой практике нормирования труда в настоящее время используется система норм, отражающих различные стороны трудовой деятельности. Методическими рекомендациями по разработке систем нормирования труда в государственных (муниципальных) учреждениях Минтруда России рекомендуется на основе имеющихся типовых (межотраслевых, отраслевых, профессиональных и иных) норм труда, утвержденных федеральными органами исполнительной власти, для применения в учреждении определять: нормы времени (трудоемкость), нормы обслуживания и нормы численности.

На данный момент для оценки трудоемкости НИОКР применяются различные подходы нормирования труда, а именно экспертные, аналитические расчетные, опытно-статистические [7]. Данные подходы рассмотрены подробнее (табл. 1).

К сожалению, изученные методы не могут в полной мере учесть описанные ранее особенности

научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, поэтому вопрос о создании отдельного подхода определения трудоемкости применительно к НИОКР остается более чем актуальным.

Трудозатраты зависят от множества факторов разного характера. Среди них можно выделить содержание выполняемой работы, уровень ее сложности, состав и квалификацию участников, наличие предварительных наработок и множество других аспектов [7]. В связи с этим следует классифицировать научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (рис. 1).

В соответствии с методическими рекомендациями по нормированию труда на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [13] для решения практических задач установления трудоемкости НИР и ОКР могут быть выделены обобщающие и частные факторы. В данном случае следует остановиться на обобщающих факторах, так как именно они оказывают определяющее (наибольшее) воздействие при проведении работ в сфере НИР и ОКР [14].

К определяющим факторам следует отнести неопределенность, сложность, новизну и ресурсные ограничения [13].

Неопределенность. Уровень неопределенности в процессе выполнения НИОКР является наиболее изменчивым аспектом трудоемкости, так как основная цель данного процесса заключается в получении новой информации, которая постепенно снижает исходную неопределенность. Поэтому оценка уровня неопределенности должна проводиться одновременно с определением трудозатрат.

Начальный уровень неопределенности определяется степенью полноты имеющегося научного или научно-технического задела (НТЗ). Под НТЗ понимается совокупность научных знаний и результатов, полученных в ходе изучения свойств материи, процессов, явлений и природных законов, а также экспериментального подтверждения и теоретического обоснования способов совершенствования. Эти результаты могут в дальнейшем служить основой для разработки новых методов, технологий, материалов, элементов и других решений, направленных на решение актуальных задач. Наличие НТЗ значительно упрощает проведение исследований,

а в некоторых случаях делает их выполнение в установленные сроки с требуемым качеством принципиально возможным [13]. В свою очередь, НИОКР-процесс по мере снижения неопределенности можно проранжировать следующим образом:

- фундаментальные исследования;
- поисковые исследования;
- прикладные исследования;
- разработки;
- опытно-конструкторские работы.

Таким образом, неопределенность не только работ, но и событий, сильнее всего проявляется для теоретических исследований и убывает по мере перехода к разработкам.

Сложность в рамках НИОКР может быть рассмотрена с двух точек зрения: объектов и процессов. Для решения практических задач определения трудоемкости целесообразно использовать один из обобщенных показателей сложности, поскольку эти аспекты взаимно влияют друг на друга [13].

Сложность объектов анализируется в двух направлениях: структурном и параметрическом. Структурная сложность связана с качественными и количественными характеристиками уровней структуризации, компоновочными особенностями и взаимодействием функциональных элементов объекта. К числу показателей структурной сложности можно отнести модульность изделия, количество и разнообразие типов устройств и компонентов. Параметрическая сложность определяется степенью влияния технических характеристик объекта на трудоемкость его проектирования. Она также включает в себя учет особенностей окружающей среды и условий эксплуатации, в которых планируется использование разработанных объектов [13].

В свою очередь, сложность процессов может быть ранжирована следующим образом:

- получение принципиально новых результатов, неизвестных науке, разработка новых теорий, открытие закономерностей, создание принципиально новых устройств, веществ, способов;
- установление некоторых общих закономерностей, разработка новых устройств, методов, способов, алгоритмов, принципиальные усовершенствования;

— положительное решение поставленных задач на основе простых обобщений, анализ связей между факторами, распространение неизвестных принципов на новые объекты, воспроизводство устройств, агрегатов;

— описание отдельных элементарных факторов, реферативные обзоры, передача и распространение опыта [13].

В качестве обобщающего показателя, характеризующего сложность НИОКР, может выступать их научно-технический уровень (НТУ). В зависимости от уровня НТУ можно представить следующую градацию НИОКР:

- НТУ превышает мировые достижения;
- НТУ находится на уровне мировых достижений;
- НТУ приближается к мировым достижениям;
- низкий НТУ;
- тривиальный НТУ.

Новизна. Новизна НИОКР также рассматривается в двух аспектах: новизна результата (объекта) исследования (разработки) и новизна процесса исследования (разработки).

Новизна разрабатываемого объекта характеризуется уровнем изменения технических параметров нового изделия по отношению к прошлым разработкам и долей измененной части создаваемого нового объекта.

Применительно к процессу исследований и разработок предлагается рассматривать новизну как качественный фактор [15], имеющий пять возможных состояний [16]:

- воспроизведение существующих решений;
- модификация существующих решений;
- модернизация существующих решений;
- создание новых разработок с полным циклом ОКР и экспериментальных проверок;
- создание новых разработок на основе новых конструктивных принципов.

Ресурсные ограничения. На трудоемкость выполнения НИОКР могут влиять ресурсные ограничения различного характера. В первую очередь это касается трудовых ресурсов.

Реализация НИОКР во многом будет зависеть от квалификации исполнителей, наличия у них опы-

Таблица 2

Ранжирование НИОКР в зависимости от степени влияния на трудоемкость выделенных групп факторов

Дифференциация по группам воздействующих факторов					Степень влияния на трудоемкость
№	По степени неопределенности результатов	По новизне	По сложности	По ресурсным ограничениям	
1	Опытно-конструкторские работы	Воспроизведение	Тривиальный НТУ	С низкими ограничениями	Практически не влияют
2	Разработки	Модификация	Низкий НТУ	С умеренными ограничениями	Слабо влияют
3	Прикладные исследования	Модернизация	НТУ приближается к мировым достижениям	Со средними ограничениями	В существенной мере влияют
4	Поисковые исследования	Полный цикл ОКР	НТУ находится на уровне мировых достижений	С высокими ограничениями	Сильно влияют
5	Фундаментальные исследования	Полный цикл НИОКР	НТУ превышает мировые достижения	С критическими ограничениями	Очень сильно влияют



Рис. 2. Этапы оценки трудоемкости НИОКР

та участия в НИОКР, их численности и степени занятости.

Немалую роль играют условия научного труда и принципы вознаграждения ученых и изобретателей. Мотивационная политика и система вознаграждения исследователей, наличие возможностей для профессионального и карьерного роста, а также создание благоприятной корпоративной среды в организации способствуют повышению мотивации к эффективному выполнению задач.

Помимо факторов, непосредственно связанных с сотрудниками, есть еще материально-техническая база организации. Большую роль будет играть оснащение, начиная от оборудования, заканчивая рабочей мебелью. Так, например, устаревшее оборудование не только замедляет процесс исследований, но и может привести к ошибкам в результате, в то время как передовые технологии способны существенно повысить точность и надежность получаемых данных.

Исходя из этого, можно выделить следующие пять уровней НИОКР в зависимости от ресурсных ограничений:

- с низкими ограничениями;
- с умеренными ограничениями;
- со средними ограничениями;
- с высокими ограничениями;
- с критическими ограничениями.

Продemonстрируем, в какой степени выделенные группы факторов оказывают влияние на трудоемкость проведения НИОКР (табл. 2).

Далее, учитывая выявленные особенности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также группы факторов, оказывающих существенное влияние на их трудоемкость, приступим к формированию этапов оценки трудоемкости НИОКР. Представим общую схему (рис. 2) с этапами оценки трудоемкости НИОКР [17, 18].

В первую очередь необходимо разбить НИОКР на этапы и подэтапы, которые будут являться типовыми на предприятии [16]. При разбиении на этапы следует ориентироваться на ГОСТ 15.101, ГОСТ Р 15.201, ГОСТ РВ 15.203 и ГОСТ 2.103. Однако представленные в данных документах этапы организации НИОКР являются обобщенными, поэтому они могут быть подвергнуты корректировке и декомпозиции со стороны предприятия.

Далее для определения трудоемкости отдельных этапов и подэтапов НИОКР проводится анализ нормативных документов, которые могли бы быть применимы для проводимых работ. Если же не об-

наружено подходящих нормативных документов, путем экспертной оценки без опоры на нормативы осуществляется получение оптимистической (минимальной — $T_{\min \text{ ож}}$) и пессимистической (максимальной — $T_{\max \text{ ож}}$) оценок времени выполнения этапов. По каждому этапу оцениваются предельные значения трудоемкости ($T_{\min}$ и $T_{\max}$) как среднее геометрическое оценок экспертов [18].

$$T_{\min} = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m T_{j \min \text{ ож}}}, \quad (1)$$

где $T_{j \min \text{ ож}}$ — оптимистическая оценка j -го эксперта.

$$T_{\max} = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m T_{j \max \text{ ож}}}, \quad (2)$$

где $T_{j \max \text{ ож}}$ — пессимистическая оценка j -го эксперта.

Если же есть документы, на которые можно было бы ориентироваться при оценке трудоемкости, необходимо адаптировать данные значения под рассматриваемые работы. Поэтому эксперты выставляют свои оценки с опорой на представленные там значения трудоемкости.

В случае, когда существуют готовые нормативы трудоемкости, но их значения заданы в виде интервала, необходимо обосновать, почему стоило бы брать то или иное значение из этого интервала. Данное обоснование будет осуществлено в рамках последующих шагов, а на данном — крайние значения этого интервала принимаются как предельные значения трудоемкости без проведения экспертного опроса.

Далее интервал между $T_{\min}$ и $T_{\max}$ разбивается на n возможных значений трудоемкости в соответствии с принципами арифметической прогрессии. Значение n организация может установить самостоятельно в зависимости от степени точности, которую она хочет достичь:

$$d = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{n - 1}. \quad (3)$$

На следующем шаге эксперты определяют степень влияния на трудоемкость четырех групп факторов: неопределенность, сложность, новизна, ресурсные ограничения. Оценка осуществляется по шкале от 1 до n . Суммарное влияние (V) на этапе определяется как арифметическая сумма отдельно воздействующих групп факторов.

Затем по рассматриваемому этапу оценивается итоговое влияние. Для этого будет использоваться

Таблица 3

Сопоставление значений итогового влияния с трудоемкостью

Количественные значения итогового влияния	Лингвистические значения	Соответствующее значение трудоемкости
$\bar{V}_n \in [4; 4 + l)$	Незначительное итоговое влияние	$T_{\min}$
$\bar{V}_n \in [4 + l; 4 + 2l)$	Слабое итоговое влияние	$T_{\min} + d$
...	...	...
$\bar{V}_n \in [4 \cdot n - 1; 4n)$	Очень сильное итоговое влияние	$T_{\max}$

$$\bar{V}_n = \frac{\sum_{j=1}^m w_j \cdot V_j}{\sum_{j=1}^m w_j},$$

где w_j (вес оценки j -го эксперта) = $1/S_j$; S_j — разность между ожидаемыми значениями трудоемкости, указанными j -м экспертом при первом опросе; V_j — суммарное влияние факторов на этапе, по оценке j -го эксперта; m — количество экспертов.

Если же в качестве предельных значений трудоемкости использовались готовые интервальные значения, необходимость учитывать вес оценок экспертов отпадает и обработка результатов сводится к использованию простого среднего арифметического.

Последним шагом будет сопоставление полученного значения итогового влияния с одним из n значений трудоемкости, определенных на третьем шаге (табл. 3).

Для наглядности описанный механизм определения трудоемкости этапов и подэтапов представлен в виде схемы (рис. 3).

Для расчета общей трудоемкости выполнения НИОКР могут применяться методы сетевого планирования. Эти методы позволяют определить критический путь, который включает работы с наибольшей трудоемкостью [20].

После завершения НИОКР на предприятии появляется информация о фактической трудоемкости проведенных исследований и разработок. В случае выявления значимых отклонений необходимо установить их причины и пересмотреть оценки по обобщающим факторам.

В итоге на предприятии формируется собственная нормативная база, которая в дальнейшем позволит осуществлять прогнозирование трудоемкости НИОКР на основе накопленных фактических данных.

Заключение. Разработана классификация НИОКР с учетом факторов, влияющих на трудоемкость. Особое место в ней занимают обобщенные группы факторов, оказывающих наибольшее влияние на трудоемкость: неопределенность, сложность, новизна, ресурсные ограничения.

Разработаны этапы оценки трудоемкости НИОКР, позволяющие не только оценить трудоемкость текущих НИОКР, но и сформировать базу для осуществления прогнозирования трудоемкости в дальнейшем.

Список источников

1. Инвестиции в исследования и разработки. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135576> (дата обращения: 15.09.2024).
2. Бурганов Р. А. Планирование на предприятии. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 260 с. ISBN 978-5-507-46856-0.
3. Козлов Ю. Д., Дробот А. Н., Корнилова Ю. А. Направление нормирования научного труда при выполнении НИОКР // Вестник ФКУ НИИИТ ФСИН России. 2021. Вып. 3. С. 123 — 126. EDN: TNUJPW.
4. Дурнев Р. А., Жданенко И. В. Оценка трудоемкости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области безопасности жизнедеятельности: проблемы, идеи, подходы: моногр. / под ред. В. А. Акимова. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 256 с. ISBN 978-5-93970-074-0. EDN: RIJBUL.
5. Феоктистова О. А. Нормирование научно-исследовательского труда: методологические подходы // Интер-



Рис. 3. Схема определения трудоемкости этапов и подэтапов НИОКР

взвешенное среднее арифметическое. Вес оценки эксперта варьируется в зависимости от S — расстояния между минимальной и максимальной оценкой времени выполнения этапа, которые указаны экспертом в первом опросе. Между данным расстоянием и весом устанавливается обратная пропорциональная зависимость [19].

нет-журнал «Науковедение». URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/109EVN514.pdf> (дата обращения: 15.09.2024).

6. Гринева Н. В. Управление рисками в инновационной деятельности // Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика. 2008. № 6. С. 118–129. EDN: KVEFTZ.

7. Васина О. В., Третьякова В. А. Нормирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ // Управление научно-техническими проектами: материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф. 2019. С. 54–61. EDN: BVWHEL.

8. Третьякова В. А. Организация и нормирование труда в наукоемких производствах. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 78 с. ISBN 978-5-7038-5061-9.

9. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование. В 3 ч. Ч. 2. Экспертные оценки. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.

10. Корнилова А. Ю., Палей Т. Ф. Проблемы применения методов экспертных оценок в процессе экономического прогнозирования развития предприятия // Проблемы современной экономики. 2010. № 3. С. 124–128.

11. Васина О. В., Котова П. К., Третьякова В. А. Методы нормирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ // E-Scio. 2020. № 1 (40). С. 331–343. EDN: TGJNLU.

12. Дурнев Р. А., Жданенко И. В. О проекте методики оценки трудоемкости и стоимости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ // Технологии гражданской безопасности. 2014. Т. 11, № 2 (40). С. 28–35. EDN: SEPTNF.

13. Методические рекомендации по нормированию труда на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Шифр 13.01.06. (Утв. ФГБУ «НИИ ТСС» Минтруда России 07.03.2014 № 006). URL: http://expert275.ru/wp-content/uploads/2017/11/5_MP-по-норм-труда-на-НИОКР-13_01_06.pdf (дата обращения: 15.09.2024).

14. Сотавов А. К. Оценка научно-технического уровня инновационных проектов: организационно-управленческий аспект // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2016. № 2 (98). С. 126–130. EDN: VQBADD.

15. Зайнулина М. Р., Набиева Л. Г., Палей Т. Ф. Организация и нормирование труда в отраслях непроизводственной сферы / под ред. Т. Ф. Палей. Казань. 2013. 136 с.

16. Аникейчик Н. Д., Кинжагулов И. Ю., Федоров А. В. Планирование и управление НИР и ОКР. Санкт-Петербург: Изд-во ун-та ИТМО. 2016. 192 с.

17. Воронин С. С., Касаркин К. С., Третьякова В. А. Разработка принципов формирования нормативной базы для оценки трудоемкости НИОКР // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 524–528. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-524-525. EDN: LWPYIF.

18. Воронин С. С., Касаркин К. С., Третьякова В. А. Этапы разработки нормативной базы для нормирования НИОКР // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 7 (101). С. 20–25. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-7-20-25. EDN: FONNMO.

19. Дурнев Р. А., Жданенко И. В. О некоторых результатах нормирования научного труда // Технологии гражданской безопасности. 2014. Т. 11, № 1 (39). С. 4–11. EDN: SBDQTH.

20. Величко Е. А., Давыдовский Ф. Н. Методические основы планирования трудоемкости изготовления товарной продукции судостроительных предприятий // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 9-2. С. 269–273. EDN: WLBAKF.

ТРЕТЬЯКОВА Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры ИБМ-3 «Промышленная логистика» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н. Э. Баумана), г. Москва.
SPIN-код: 7996-8264

Адрес для переписки: tva@bmstu.ru

ВОРОНИН Степан Станиславович, магистрант гр. ИБМ3-11М факультета «Инженерный бизнес и менеджмент» МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва.
Адрес для переписки: voronin.7s4@yandex.ru

Для цитирования

Третьякова В. А., Воронин С. С. Разработка этапов оценки трудоемкости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на производственных предприятиях // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 21–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-21-29. EDN: ONILYL.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024 г.

© В. А. Третьякова, С. С. Воронин

DEVELOPMENT OF STAGES FOR ASSESSING LABOR INTENSITY OF RESEARCH AND DEVELOPMENT IN MANUFACTURING ENTERPRISES

To produce competitive products, enterprises must engage in research and development activities. This work involves numerous specific factors that significantly complicate the process of labor intensity assessment. Existing labor standardization methods, while potentially applicable for evaluating labor intensity, are not fully adapted for research and development activities. Therefore, it is advisable to develop dedicated stages for assessing the labor intensity of research and development activities, allowing for consideration of all unique factors relevant to these activities.

Keywords: research and development, research work, development work, labor intensity, planning, standards.

References

1. Investitsii v issledovaniya i razrabotki [Investments in research and development]. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135576> (accessed: 15.09.2024). (In Russ.).
2. Burganov R. A. Planirovaniye na predpriyatii [Enterprise planning]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2023. 260 p. ISBN 978-5-507-46856-0. (In Russ.).
3. Kozlov Yu. D., Drobot A. N., Kornilova Yu. A. Napravleniya normirovaniya nauchnogo truda pri vypolnenii NIOKR [Directions of scientific labor standardization in R&D]. *Vestnik FNU NIIT FSIN Rossii*. 2021. Issue 3. P. 123–126. EDN: TNUJPW. (In Russ.).
4. Durnev R. A., Zhdanenko I. V. Otsenka trudoyemkosti nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot v oblasti bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy, idei, podkhody [Evaluation of the Labor Intensity of R&D in Life Safety: Problems, Ideas, Approaches] / Ed. by V. A. Akimov. Moscow, 2012. 256 p. ISBN 978-5-93970-074-0. EDN: PLJBUL. (In Russ.).
5. Feoktistova O. A. Normirovanie nauchno-issledovatel'skogo truda: metodologicheskie podkhody [Norm-setting of research work: methodological approaches]. *Internet-journal «Naukovedenie»*. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/109EVN514.pdf> (accessed: 15.09.2024). (In Russ.).
6. Grineva N. V. Upravlenie riskami v innovatsionnoy deyatel'nosti [Risk management in innovative activities]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6. Ekonomika. Moscow University Economics Bulletin*. 2008. No. 6. P. 118–129. EDN: KVEFTZ. (In Russ.).
7. Vasina O. V., Tret'yakova V. A. Normirovaniye nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot [Regulation of R&D]. *Upravleniye nauchno-tehnicheskimi proyektami. Management of Scientific and Technical Projects*. 2019. P. 54–61. (In Russ.).
8. Tret'yakova V. A. Organizatsiya i normirovanie truda v naukoemkikh proizvodstvakh [Organization and labor standardization in knowledge-intensive production]. Moscow, 78 p. 2018. ISBN 978-5-7038-5061-9. (In Russ.).
9. Orlov A. I. Organizatsionno-ekonomicheskoye modelirovaniye. V 3 ch. Ch. 2. Ekspertnyye otsenki [Organizational and economic modeling. In 3 parts. Part 2. Expert evaluations]. Moscow, 2011. 486 p. (In Russ.).
10. Kornilova A. Yu., Paley T. F. Problemy primeneniya metodov ekspertnykh otsenok v protsesse ekonomicheskogo prognozirovaniya razvitiya predpriyatiya [Issues in applying expert assessment methods in the process of enterprise development forecasting]. *Problemy sovremennoy ekonomiki. Problems of Modern Economics*. 2010. No. 3. P. 124–128. (In Russ.).
11. Vasina O. V., Kotova P. K., Tret'yakova V. A. Metody normirovaniya nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot [Methods of the R&D standardizing]. *E-Scio*. 2020. No. 1 (40). P. 331–343. EDN: TGJNLU. (In Russ.).
12. Durnev R. A., Zhdanenko I. V. O projekte metodiki otsenki trudoyemkosti i stoimosti nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot [About the project of the technique of the assessment of labour input and cost of the R&D]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. Technologies of Civil Safety*. 2014. Vol. 11, no. 2 (40). P. 28–35. EDN: SEPTNF. (In Russ.).
13. Metodicheskiye rekomendatsii po normirovaniyu truda na vypolneniye nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot [Methodological recommendations for labor standardization for R&D]. URL: http://expert275.ru/wp-content/uploads/2017/11/5_MP-по-норм-труда-на-НИОКР-13_01_06.pdf (accessed: 15.09.2024). (In Russ.).
14. Sotavov A. K. Otsenka nauchno-tehnicheskogo urovnya innovatsionnykh projektov: organizatsionno-upravlencheskiy aspekt [Evaluation of scientific and technological level of innovation projects: organizational-administrative aspect]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. Bulletin of the St. Petersburg State University of Economics*. 2016. No. 2 (98). P. 126–130. EDN: VQBADD. (In Russ.).
15. Zainullina M. R., Nabieva L. G., Paley T. F. Organizatsiya i normirovanie truda v otraslyakh neproizvodstvennoy sfery: uchebnoye posobie [Organization and labor standardization in non-production sectors: study guide] / Ed. by T. F. Paley. Kazan, 2013. 136 p. (In Russ.).

16. Anikeychik N. D., Kinzhagulov I. Yu., Fedorov A. V. Planirovaniye i upravleniye NIR i OKR [Planning and management of R&D]. Saint Petersburg, 2016. 192 p. (In Russ.).

17. Voronin S. S., Kasarkin K. S., Tret'yakova V. A. Razrabotka printsiptov formirovaniya normativnoy bazy dlya otsenki trudoyemkosti NIOKR [Development of principles of normative base formation for estimation of labor intensity of R&D]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 11. P. 524–528. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-524-525. EDN: LWPYIF. (In Russ.).

18. Voronin S. S., Kasarkin K. S., Tret'yakova V. A. Etapy razrabotki normativnoy bazy dlya normirovaniya NIOKR [Stages of developing of the regulatory framework for R&D standardization]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika. Economics and Business: Theory and Practice*. 2023. No. 7 (101). P. 20–25. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-7-20-25. EDN: FONNMO. (In Russ.).

19. Durnev R. A., Zhdanenko I. V. O nekotorykh rezul'tatakh normirovaniya nauchnogo truda [About some results of rationing of scientific work]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. Civil Security Technologies*. 2014. Vol. 11, no. 1 (39). P. 4–11. EDN: SBDQTH. (In Russ.).

20. Velichko E. A., Davydovskiy F. N. Metodicheskiye osnovy planirovaniya trudoyemkosti izgotovleniya tovarnoy produktsii sudostroitel'nykh predpriyatiy [Methodical bases of planning complexity of the manufacture of commercial products shipyards].

Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. International Journal of Experimental Education. 2016. No. 9-2. P. 269–273. EDN: WLBAKF. (In Russ.).

TRETYAKOVA Victoria Alexandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the IBM-3 Logistics of High-tech Industries Department, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow. SPIN-code: 7996-8264

Correspondence address: tva@bmstu.ru

VORONIN Stepan Stanislavovich, Undergraduate of the IBM3-11M group of the Engineering Business and Management Faculty, BMSTU, Moscow.

Correspondence address: voronin.7s4@yandex.ru

For citations

Tretyakova V. A., Voronin S. S. Development of stages for assessing labor intensity of research and development in manufacturing enterprises. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 21–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-21-29. EDN: ONILYL.

Received October 10, 2024.

© V. A. Tretyakova, S. S. Voronin

А. В. ШИМОХИН¹
А. Н. СОРОКИН¹
С. Н. БОЛТОВСКИЙ¹
В. Н. КУЗНЕЦОВА²
И. С. КУЗНЕЦОВ²

¹Омский государственный
аграрный университет
имени П. А. Столыпина,
г. Омск

²Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет,
г. Омск

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ, ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

В данной статье рассматривается способ оптимизации распределения материала внутри образца, полученного с помощью 3D-печати. Рассматривается несколько вариантов распределения материала, в том числе по форме балки равного сопротивления при сохранении внешнего каркаса образца в виде прямоугольного параллелепипеда с квадратным сечением. Изготовленные образцы подвергались разрушению при испытании на статический изгиб. Полученные результаты показывают уменьшение используемого материала на 30 % и сохранение прочностных свойств образцов относительно образца со 100 %-ным заполнением материалом. Приведены результаты эксперимента и отмечены вопросы для дальнейших исследований.

Ключевые слова: аддитивные технологии, балка равного сопротивления, топологическая оптимизация, 3D-печать, испытание на статический изгиб, механические свойства, снижение массы.

Введение. Топологическая оптимизация определяется как создание оптимальной конструкции детали с распределением массы таким образом, что сохраняются ее свойства соответствовать всем требованиям эксплуатации, в том числе выдерживать определенные нагрузки. Само направление сформировалось и исследовалось в 1980-х годах, но практическое применение и распространение начало находить в последнее время за счет появления и развития аддитивной технологии.

Одним из примеров можно отметить работу компании Airbus. Которая в 2016 году представила электромоторчик с рамой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати — SLM. При этом форма рамы была существенно оптимизирована и отличается от стандартных конструкций. В результате вес мотоцикла всего 35 кг, что на 35 % меньше аналогичных электромоторчиков со стандартной конструкцией рамы.

Также отметим работу в МГТУ им. Н. Э. Баумана, где провели модернизацию стойки подвески с помощью топологической оптимизации и 3D-печати (рис. 1) [1].

В результате применения топологической оптимизации получили бионическую форму конструкции поворотной стойки, которая прошла проверку на прочность с помощью цифрового моделирования [2]. Для 3D-печати рассчитали остаточные напряжения, коробления и геометрические отклонения в процессе остывания. Для печати применялся материал — высокопрочный порошковый алюминий.

В итоге за счет применения топологической оптимизации и 3D-печати вес детали уменьшился в 2 раза. Также данные методы позволяют уменьшить количество деталей в узлах, создавать конструкции, которые раньше было невозможно получить, уменьшить количество сборок в узлах, а также создавать изделие без склеек, спаек и т.д. [2, 3]. С каждым годом примеров успешного применения топологической оптимизации совместно с 3D-печатью в машиностроении становится больше.

3D-печать металлом использует метод селективного лазерного спекания (SLM) и прямое лазерное спекание металлов (DSLM). Также существует метод с послойным соединением, при котором склеиваются частицы металла для последующего обжига

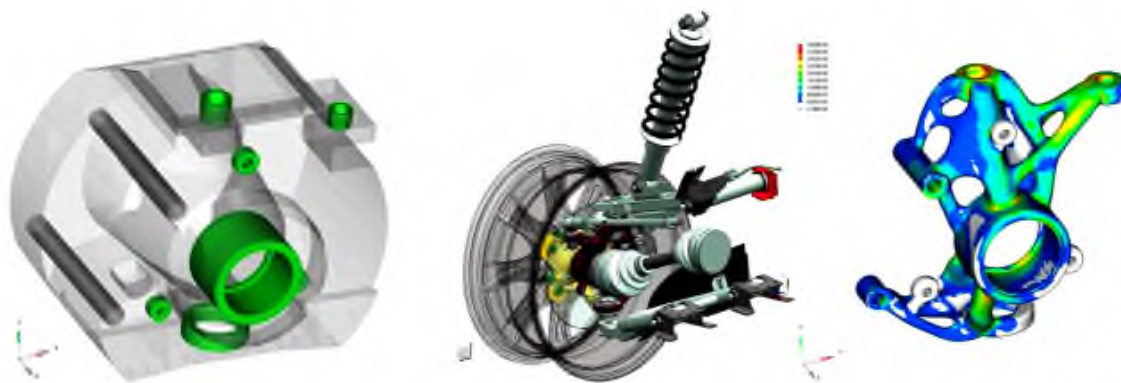


Рис. 1. Результат применения топологической оптимизации стойки подвески

в высокотемпературной печи, где частицы сплавляются под давлением, составляя единое металлическое целое. Печатная головка наносит соединительный раствор на порошковую подложку послойно, как обычный принтер на листы бумаги, после чего изделие отправляется в обжиг. В качестве материалов используются различные металлические порошки, например, из нержавеющей стали 316L Unit3DMetal, алюминиевый сплав AlSi10Mg и др. Отметим также метод прямой лазерной наплавки DED — представляет собой метод послойного наращивания деталей. Материал подается в виде порошка или проволоки в месте построения.

В месте построения луч лазера формирует на поверхности создаваемой детали ванну расплава. Поступающий материал переходит в жидкое состояние и соединяется с предыдущим слоем. В зоне обработки подается также защитный газ (аргон).

Цель исследования. Исследовать применение балки равного сопротивления для оптимизации распределения материала внутри изделий, полученных методом 3D-печати FDM, с возможностью сохранения прочностных свойств.

Задачи

1. Разработать варианты распределения материала внутри образцов и изготовить их с помощью метода 3D-печати FDM.

2. Провести испытания на статический изгиб.

Основная часть. Прочность деталей задается свойствами металла и последующей термообработкой, которая проводится при необходимости получения определённых свойств материала детали [4].

Для изготовления пластмассовых изделий с помощью 3D-печати применяются методы FMD, SLM и другие. Далее будем рассматривать FMD. В данном случае прочность деталей зависит от степени адгезии (A), которая может определяться скоростью печати (v), температурой плавления (t), толщиной слоя (s), а также топологией деталей, то есть распределением материала (top), $f(A) = f(v, t, s, top)$.

В настоящее время рассматриваются вопросы прочности деталей при изготовлении методом FMD печати из пластмассы [2–6]. Наблюдается тенденция [7, 8] развития прочностных свойств пластмасс для 3D-печати. Например, можно отметить такие как полиэфирэфиркетон или РЕЕК, обладающий следующими характеристиками:

- плотность — $1,3 \text{ г/см}^3$;
- температура плавления — $343 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура стеклования — $143 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура эксплуатации от $-70 \text{ }^\circ\text{C}$

до $-230 \text{ }^\circ\text{C}$, выдерживает краткосрочные нагревы до $300 \text{ }^\circ\text{C}$;

— предел текучести — 120 МПа .

Полиэфиримид (PEI), обладающий следующими характеристиками:

- плотность — $1,27 \text{ г/см}^3$;
- температура плавления $\sim 370 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура стеклования — $217 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура эксплуатации от $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $-120 \text{ }^\circ\text{C}$, выдерживает краткосрочные нагревы до $170 \text{ }^\circ\text{C}$.

SBS (стиролбутадиен-стирол) отмечается низкой токсичностью и обладает следующими свойствами:

- температура плавления — $190-210 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура размягчения — $76 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура эксплуатации от $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ до $-65 \text{ }^\circ\text{C}$;

— твердость (по Роквеллу) — R118;

— прочность на изгиб — 36 МПа ;

— прочность на разрыв — 34 МПа ;

— модуль упругости при растяжении — $1,35 \text{ ГПа}$;

- модуль упругости при изгибе — $1,45 \text{ ГПа}$;
- температура стеклования — $95 \text{ }^\circ\text{C}$;
- плотность — $1,01 \text{ г/см}^3$.

Можно также отметить Nylon, который является более доступным по цене и не требует особых свойств 3D-принтера, с характеристиками:

- плотность — $1,134 \text{ г/см}^3$;
- влагопоглощение — $3,09\%$;
- прочность на разрыв — $65,99 \text{ МПа}$;
- относительное удлинение при разрыве — более 300% .

Для исследования прочностных свойств при различном распределении материала внутри детали были созданы образцы в соответствии с [9], с размерами $30 \times 30 \times 80$ из нескольких видов пластмасс.

Распределение материала внутри образца выполнялось в двух вариантах в горизонтальном сечении, как показано на рис. 2а и 2б. По высоте все горизонтальные сечения одинаковы. Как известно, при изгибе по схеме нагружения по рис. 3 нормальные напряжения изгиба изменяются по линейному закону (закону треугольника) от нуля в сечениях опорных призм до максимума в сечении приложения силы F . Площадь сечения также изменяется по закону треугольника. То есть в сечениях с меньшим напряжением меньший объем материала. Все стенки каркаса образца, включая верхнюю и нижнюю, одинаковы и равны 2 мм .

Результаты сравнивались с образцом сплошного заполнения материалом по всему объему.

Распределение материала в сечениях а — а и б — б показаны на рис. 3.

Схема нагружения представлена на рис. 4.

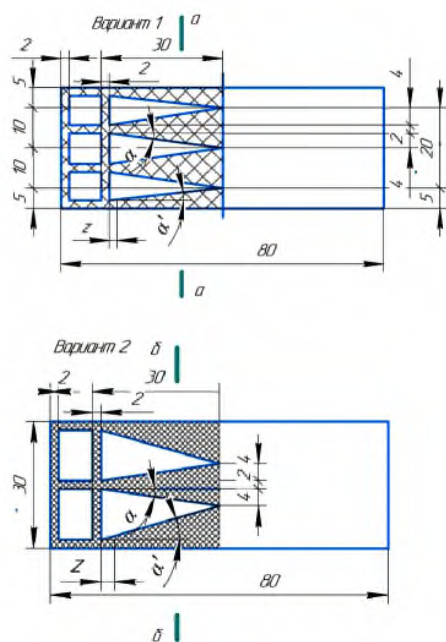


Рис. 2. Распределение материала внутри образца:
а) по 1-му варианту (горизонтальное сечение);
б) по 2-му варианту

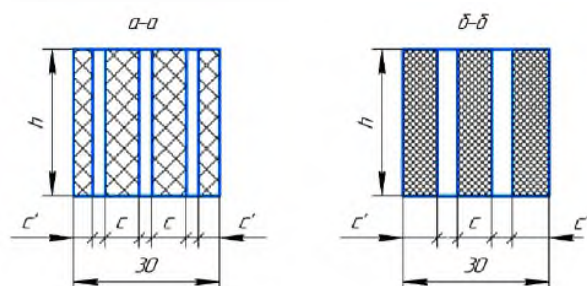


Рис. 3. Распределение материала в сечениях а-а и б-б

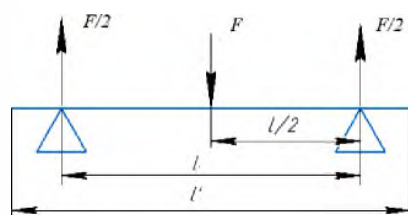


Рис. 4. Схема нагружения образца:
 $l = 80$ мм — длина образца;
 $l' = 60$ мм — расстояние между опорными призмами испытательной машины

Соотношение распределения материала в рабочей части образцов длиной 60 мм, выполненных по вариантам 1, 2 и заполненного по всему объему, определим из соотношения объемов образцов.

Объем пустоты в образцах вариантов 1 и 2:

$$V_1 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 22 \cdot 28 \cdot 26 = 16016 \text{ мм}^3,$$

$$V_2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 24 \cdot 28 \cdot 26 = 17472 \text{ мм}^3,$$

(1)

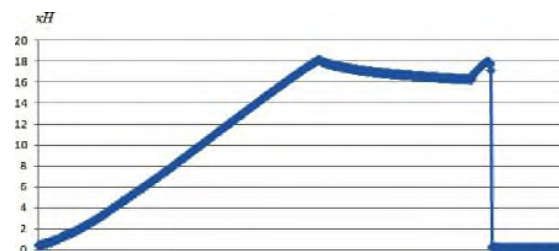


Рис. 5. Диаграмма нагружения образца, заполненного по всему объему

где 2 — две половины образца; 22 и 24 — общая ширина треугольников пустоты в образцах 1 и 2; 28 — высота треугольников; 26 — высота пустоты в образце (за исключением толщины верхней и нижней стенок каркаса).

Объем образца, заполненного по всему объему,

$$V = 30 \cdot 60 \cdot 30 = 54000 \text{ мм}^3. \quad (2)$$

Соотношение объемов пустоты в образцах 1 и 2 вариантов к объему цельного образца

$$\frac{V_1}{V} = \frac{16016}{54000} \cdot 100 = 29,7\%, \quad \frac{V_2}{V} = \frac{17472}{54000} \cdot 100 = 32,4\%.$$

Так как материал однороден, то его экономия составляет приблизительно 30 % (в первом случае — 29,7 %, во втором — 32,4 %).

При определении нормальных напряжений изгиба $\sigma_x = M_x / W_x$ в сечениях образца по его длине переменными величинами являются изгибающий момент M_x и осевой момент сопротивления W_x , которые зависят от переменной z .

При испытании на машине ЛКСМ 1К в соответствии со схемой по рис. 4 образца, заполненного по всему объему, получили предельную нагрузку $F = 18,2$ кН (рис. 5), при которой происходит его разрушение.

Поперечное сечение образца представляет собой фигуру, состоящую из четырех прямоугольников одинаковой высоты ($h = 30$ мм), см. рис. 2 и 3. При этом осевой момент сопротивления можно определить по формуле:

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = b \frac{30^2}{6} = 150b, \quad (3)$$

где b — суммарная ширина прямоугольников в поперечных сечениях образца.

Текущее значение суммарной ширины прямоугольников в зависимости от z :

— для варианта 1 (рис. 2а)

$$b = 2c + 2c' = 2[2(z - 2)\text{tg}\alpha + 2] + 2[(z - 2)\text{tg}\alpha' + 2],$$

где $\text{tg}\alpha = 4/28$, $\text{tg}\alpha' = 3/28$, после преобразований $b = 0,7857z + 6,4286$;

— для варианта 2 (рис. 2б)

$$b = c + 2c' = [2(z - 2)\text{tg}\alpha + 2] + 2[(z - 2)\text{tg}\alpha' + 2],$$

где $\text{tg}\alpha = 4/28$, $\text{tg}\alpha' = 8/28$, после преобразований $b = 0,8571z + 4,2858$.

Параметр	Значение переменной z, мм					
	5	10	15	20	25	30
Вариант образца 1						
b_z , мм	10,36	14,29	18,21	22,14	26,07	30
M_{μ} , Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
W_{xz} , мм ³	1554	2143,5	2731,5	3321	3910,5	4500
α_{μ} , МПа	29,28	42,46	49,97	54,80	58,18	60,67
Вариант образца 2						
b_z , мм	7,5	10	12,5	15	17,5	20
M_{μ} , Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
W_{xz} , мм ³	1285,5	1929	2571	3214,5	3856,5	4500
α_{μ} , МПа	35,39	47,17	53,09	56,62	58,99	60,67

Текущее значение изгибающего момента в сечениях образца в зависимости от z

$$M_{\text{z}} = \frac{F}{2} z = \frac{18200}{2} z = 9100 z.$$

Значения параметров и напряжений изгиба в зависимости от переменной z с шагом 5 мм представлены в табл. 1. Максимальные напряжения у обоих вариантов образцов возникают в средней части и уменьшаются к их концам. То есть сечения, находящиеся ближе к концам, недогружены.

С целью выравнивания напряжений по длине и экономии материала применены образцы в виде балок равного сопротивления изгибу [10, 11] (рис. б). При этом текущее значение осевого момента сопротивления при одинаковом напряжении во всех сечениях равно $\sigma_{\text{доп}} = 60,67 \text{ МПа}$.

$$W_x = \frac{M_n}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{9100z}{60,67} - 150z. \quad (4)$$

Из равенства осевых моментов сопротивления, определенных по формулам (3) и (4), $150b = 150z$ текущее значение суммарной ширины прямоугольников сечения

$$b = \frac{150\pi}{150} = \pi.$$

Для обеспечения жесткости принимаем толщину внутренних ребер на концах образцов, как и толщину боковых стенок каркаса, равной 2 мм (рис. 6). Тогда расстояние (координата) постоянного сечения в образцах вариантов 1 и 2

$$\pi_1 = \frac{150b_1}{150} = \frac{150 \cdot 8}{150} = 8 \text{ MM},$$

$$z_2 = \frac{150b_2}{150} = \frac{150 \cdot 6}{150} = 6 \text{ mm},$$

где $b_1 = 8$, $b_2 = 6$ — суммарная ширина прямоугольников сечений,

Напряжения изгиба в образцах равного сопротивления изгибу в зависимости от переменной z с шагом 5 мм представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что на участках образцов с переменным сечением напряжения изгиба одинаковы

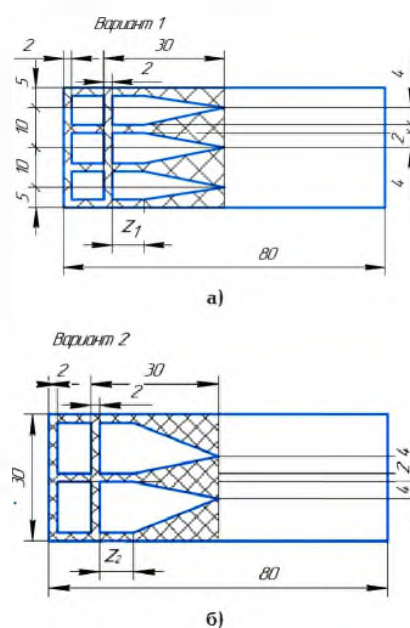


Рис. 6. Распределение материала по результатам расчетов:
а) для 1-го варианта; б) для 2-го варианта

$\sigma_{\text{н}} = 60,67$ МПа, то есть, получены образцы с равным сопротивлением изгибу.

Объем пустоты в образцах равного сопротивления изгибу в первом и втором вариантах в соответствии с формулами (1) и рис. 7:

$$V_1 = 2 \left[\frac{1}{2} 22 \cdot (30 - 8) \cdot 26 + 22 \cdot (8 - 2) \cdot 26 \right] = 19448 \text{ мм}^3,$$

$$V_2 = 2 \cdot \left[\frac{1}{2} 24 \cdot (30 - 6) \cdot 26 + 24 \cdot (6 - 2) \cdot 26 \right] = 19968 \text{ mm}^3.$$

Соотношение объемов пустоты в образцах равного сопротивления изгибу в первом и втором вариантах к объему цельного образца

$$\frac{V_1}{V} = \frac{19448}{54000} \quad 100 - 36,0 \%, \quad \frac{V_2}{V} = \frac{19968}{54000} \quad 100 - 37,0 \%,$$

где V — см. формулу (2).

Таблица 2

**Напряжения изгиба в образцах равного сопротивления изгибу
в зависимости от переменной z**

Параметр	Значение переменной z , мм					
	5	10	15	20	25	30
Вариант образца 1						
b , мм	8,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
$M_{\text{н}}$, Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
W_x , мм ³	1200	1500	2250	3000	3750	4500
$\alpha_{\text{н}}$, МПа	37,92	60,67	60,67	60,67	60,67	60,67
Вариант образца 2						
b , мм	6,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
$M_{\text{н}}$, Нмм	45500	91000	136500	182000	227500	273000
W_x , мм ³	900	1500	2250	3000	3750	4500
$\alpha_{\text{н}}$, МПа	50,56	60,67	60,67	60,67	60,67	60,67

Таблица 3

Результаты экспериментальных испытаний образцов

Заполненность образца и вариант распределения материала	Среднее значение максимальной силы F_{max} при которой происходит разрушение образца, кН	Отклонение значения F_{max} для образцов от F_{max} для образца, заполненного материалом на 100 %, %
100 % заполненность	16,57	1
Балка равного сопротивления по 1-му варианту	15,5	6,5
Балка равного сопротивления по 2-му варианту	10,8	35
Материал внутри образца распределен по 1-му варианту	14,1	15
Материал внутри образца распределен по 2-му варианту	10,6	36,1

Увеличение экономии материала в образцах равного сопротивления изгибу: при первом варианте на 6,3 %, при втором варианте на 4,6 %. Общая экономия материала составила в среднем 36,5 %.

Распределение материала внутри образца по результатам расчетов представлено на рис. 6а и 6б.

Основные результаты. Результаты экспериментальных испытаний образцов представлены в табл. 3. Для проведения испытаний были изготовлены по несколько образцов каждого из вариантов из пластмассы ABS. Были изготовлены 100 % заполненные образцы, образцы по первому и второму вариантам распределения материала (рис. 2а, 2б) и образцы балок равного сопротивления по первому и второму вариантам распределения материала (рис. 6а, 6б).

Заключение. Полученные результаты показывают, что образцы балок равного сопротивления по первому варианту распределения материала имеют меньшее значение максимальной разрушающей нагрузки на ~10 %. Остальные образцы от 15 до ~36 %. Это связано с особенностями технологии FDM-печати, при которой получают изделия послойным спеканием горизонтальных слоев, прочность спекания которых существенно зависит от условий изготовления и параметров режимов FDM-печати. В образцах с меньшей площадью спекания по сравнению с образцом, заполненным материалом по всему объему, разрушение происходит со сдвигом в этих слоях (рис. 7а, 7б).

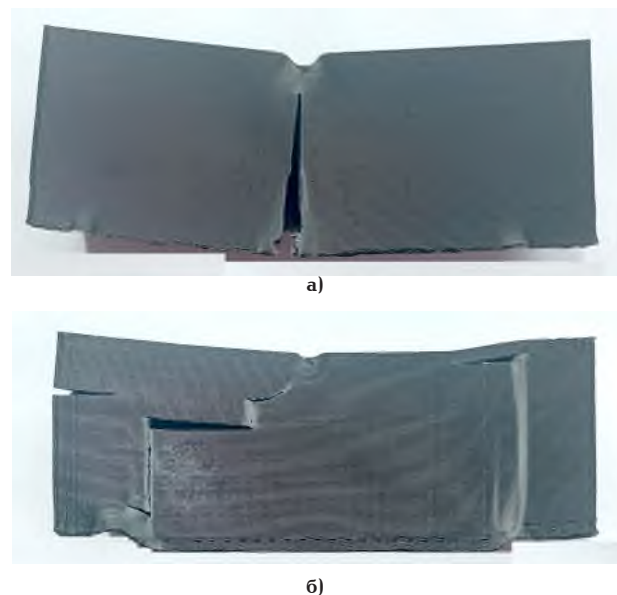


Рис. 7. а) разрушение образца заполненным материалом по всему объему; б) разрушение образца с меньшей площадью спекания

При этом уменьшается максимальная разрушающая нагрузка F_{max} , так как образец работает не как цельная балка, а как пакет пластин с каса-

тельными силами между спекаемыми слоями. Поэтому прочность понижается. Величина касательных сил зависит от качества спекания слоев. Кроме того, прочность изделий связана с анизотропией их механических свойств. В статье показана возможность распределения материала в соответствии с линейным законом изменения нормального напряжения в балке квадратного сечения в двух вариантах, в том числе и для балки равного сопротивления. Такое распределение стало возможным за счет применения аддитивных технологий. В среднем по исследуемым образцам масса и расход материала уменьшились на 30 %. Но в силу описанных выше особенностей технологии FDM-печати прочность уменьшилась на значения 10...36 %. В дальнейших исследованиях необходимо учитывать влияние условий изготовления и параметров режимов FDM-печати и анизотропию, возникающую при нагружении образца, на прочность изделий.

Список источников

1. Озеров А. Топологическая оптимизация и 3D-печать как пример взаимного развития. QIB Technologies. URL: <https://blog.qib.ru/topology-optimization-3d-printing/> (дата обращения: 07.07.2024).
2. Антиферов С. И., Карачевцева А. В., Сычёв Е. А., Литвишко А. А. Топологическая оптимизация элементов конструкции роботизированной ячейки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2023. № 11. С. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102. EDN: FODJWS.
3. Русских Г. С., Шалыгин С. В. Алгоритм формирования внутренней структуры изделия с учетом напряженно-деформированного состояния на примере трехточечного изгиба // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 80–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-80-85. EDN: TXWRGA.
4. Кондратов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А., Сорокин А. Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. EDN: RARUXZ.
5. Шимохин А. В., Союнов А. С., Биткина Е. Е., Янковский К. А. К вопросу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103. EDN: KPBBLF.
6. Петрова Г. Н., Платонов М. М., Большаков В. А. [и др.]. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM-технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // Пластические массы. 2016. № 5–6. С. 53–58. EDN: WIOBNL.
7. Коваленко Р. В. Современные полимерные материалы и технологии 3D-печати // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 1. С. 263–266. EDN: TJKZCT.
8. Кичко А. Е. Анализ современных материалов для 3D-печати // 72-я Междунар. студ. науч. техн. конф.: материалы конф., Астрахань, 18–23 апреля 2022 года. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2022. С. 758–760. EDN: SRYIOG.
9. ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010). Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. Введ. 01–03–2015. Москва: Стандартинформ, 2016. 20 с.
10. Богданов В. В., Иванов Р. В. К вопросу использования балок равного сопротивления изгибу с переменным поперечным сечением // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов: сб. материалов XVII

Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 27 декабря 2022 года. Москва: Печатный цех, 2022. С. 228–234.

11. Кузубов А. С., Бушуев Д. А., Парашук Е. М. Построение и валидация конечно-элементной виртуальной модели балки равного сопротивления весоизмерительной системы // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46, № 2. С. 274–282. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282. EDN: JPWOJO.

ШИМОХИН Антон Владимирович, кандидат экономических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета имени П. А. Столыпина (Омский ГАУ), г. Омск.

SPIN-код: 2830-8008

AuthorID (РИНЦ): 700145

ORCID: 0000-0002-2048-3180

AuthorID (SCOPUS): 57203345154

ResearcherID: ACS-9917-2022

Адрес для переписки: Av.shimokhin@omgau.org

СОРОКИН Анатолий Никифорович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского ГАУ, г. Омск.

SPIN-код: 2670-1234

AuthorID (РИНЦ): 714190

ORCID: 0009-0004-0510-2089

AuthorID (SCOPUS): 57209773219

Адрес для переписки: An.sorokin@omgau.org

БОЛТОВСКИЙ Сергей Николаевич, старший преподаватель кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского ГАУ, г. Омск.

SPIN-код: 6962-3388

AuthorID (РИНЦ): 1068092

ORCID: 0000-0002-9743-4301

AuthorID (SCOPUS): 57223111207

Адрес для переписки: sn.boltovskiy@omgau.org

КУЗНЕЦОВА Виктория Николаевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), г. Омск.

SPIN-код: 1039-7546

AuthorID (РИНЦ): 1068092

ORCID: 0000-0003-3546-0894

Адрес для переписки: dissovsibadi@bk.ru

КУЗНЕЦОВ Илья Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» СибАДИ, г. Омск.

SPIN-код: 6890-3069

AuthorID (РИНЦ): 1068092

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Адрес для переписки: ilyxa_kyznetsov@vk.com

Для цитирования

Шимохин А. В., Сорокин А. Н., Болтовский С. Н., Кузнецова В. Н., Кузнецов И. С. Исследование прочностных свойств изделий, полученных с помощью 3D-печати, при деформации изгиба для оптимизации распределения материала // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 30–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-30-37. EDN: MVIKZF.

Статья поступила в редакцию 16.09.2024 г.

© А. В. Шимохин, А. Н. Сорокин, С. Н. Болтовский,
В. Н. Кузнецова, И. С. Кузнецов

INVESTIGATION OF THE STRENGTH PROPERTY OF 3D PRINTED PRODUCTS IN BENDING DEFORMATION TO OPTIMIZE MATERIAL DISTRIBUTION

The article considers a method of optimal material distribution inside a 3D printed sample. Several variants of material distribution are considered, including the beam shape of equal resistance while retaining the outer frame of the specimen as a rectangular parallelepiped with a square cross-section. The manufactured samples are subjected to destruction during static bending testing. The results show the reduction of used material by 30 % and preservation of specimen strength properties with 100 % material filling. Moreover, experimental results are presented and research issues for further investigations are highlighted.

Keywords: additive technologies, equal resistance beam, topology optimization, 3D printing, static bending test, mechanical properties, weight reduction.

References

1. Ozerov A. Topologicheskaya optimizatsiya i 3D-pechat' kak primer vzaimnogo razvitiya. QIB Technologies [Topological optimization and 3D-printing as examples of cross-development]. URL: <https://blog.iqb.ru/topology-optimization-3d-printing/> (accessed: 07.07.2024). (In Russ.).

2. Antsiferov S. I., Karachevtseva A. V., Sychev E. A., Litvishko A. A. Topologicheskaya optimizatsiya elementov konstruktivnoy robotizirovannoy yacheyki [Topological optimization of design elements of a robotic cell]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after V. G. Shukhov*. 2023. No. 11. P. 93–102. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-93-102. EDN: FODJWS. (In Russ.).

3. Russkikh G. S., Shalygin S. V. Algoritm formirovaniya vnutrenney struktury izdeliya s uchetom napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na primere trekhtocheynogo izgiba [The algorithm for generating internal structure of product considering stress-strain on example three-point bending]. Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 80–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-80-85. EDN: TXWRGA. (In Russ.).

4. Kondratov S. V., Pykhtin A. A., Larionov S. A., Sorokin A. E. Vliyaniye tekhnologicheskikh rezhimov FDM-pechaty i sostava ispol'zuyemykh materialov na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki FDM-modeley (obzor) [Influence of the

technological FDM-modes of the press and structure of used materials on physic-mechanical characteristics of FDM-models (review)]. Trudy VIAM. *Proceedings of VIAM*. 2019. No. 10 (82). P. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49. EDN: RARUXZ. (In Russ.).

5. Shimokhin A. V., Soyunov A. S., Bitkina E. E., Yankovskiy K. A. K voprosu o primenenii additivnoy tekhnologii na predpriyatiyakh sel'skokhozyaystvennogo mashinostroyeniya [On applicability of additive technology at agricultural engineering enterprises]. Traktory i sel'khoz mashiny. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022. Vol. 89, no. 5. P. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103. EDN: KPBBLF. (In Russ.).

6. Petrova G. N., Platonov M. M., Bol'shakov V. A. [et al.]. Issledovaniye kompleksa kharakteristik bazovykh materialov dlya FDM-tekhnologii additivnogo sinteza. Fiziko-mekhanicheskiye i teplofizicheskiye svoystva [Research of the complex of characteristics of base materials for fdm of technology of the additive synthesis. physico-mechanical and heat-physical properties]. Plasticheskiye massy. *Plasticheskie Massy*. 2016. No. 5–6. P. 53–58. EDN: WIOBNL. (In Russ.).

7. Kovalenko R. V. Sovremennyye polimernyye materialy i tekhnologii 3D pechaty [Modern polymer materials and 3D printing technologies]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. *Herald of Technological University*. 2015. Vol. 18, no. 1. P. 263–266. EDN: TJKZCT. (In Russ.).

8. Kichko A. E. Analiz sovremennykh materialov dlya 3D-pechaty [Analysis of modern 3D printing materials]. 72-ya Mezhdunar. stud. nauch. tekhn. konf. Astrakhan', 2022. P. 758–760. EDN: SRYIOG. (In Russ.).

9. GOST 4648-2014 (ISO 178:2010). Plastmassy. Metod ispytaniya na staticheskiy izgib [Plastics. Method of static bending test]. Moscow, 2016. 20 p. (In Russ.).

10. Bogdanov V. V., Ivanov R. V. K voprosu ispol'zovaniya balok ravnogo soprotivleniya izgibu s peremennym poperechnym secheniyem [To the question of use of equal bending resistance beams with variable cross-sections]. *Aktual'nyye problemy nauki i obrazovaniya v usloviyakh sovremennykh vyzovov*. Moscow, 2022. P. 228–234. (In Russ.).

11. Kuzubov A. S., Bushuev D. A., Parashchuk E. M. Postroyeniye i validatsiya konechno-elementnoy virtual'noy modeli balki ravnogo soprotivleniya vesoizmeritel'noy sistemy [Construction and validation of the finite element virtual model of the beam of equal resistance of the weight measuring system]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika. Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information Technologies*. 2019. Vol. 46, no. 2. P. 274–282. DOI: 10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282. EDN: JPWOJO. (In Russ.).

SHIMOKHIN Anton Vladimirovich, Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering Department, Omsk State Agrarian University, Omsk.

SPIN-code: 2830-8008

AuthorID (RSCI): 700145

ORCID: 0000-0002-2048-3180

AuthorID (SCOPUS): 57203345154

ResearcherID: ACS-9917-2022

Correspondence address: Av.shimokhin@omgau.org

SOROKIN Anatoly Nikiforovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering Department, Omsk State Agrarian University, Omsk.

SPIN-code: 2670-1234

AuthorID (RSCI): 714190

ORCID: 0009-0004-0510-2089

AuthorID (SCOPUS): 57209773219

Correspondence address: An.sorokin@omgau.org

BOLTOVSKY Sergey Nikolaevich, Senior Lecturer of the Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering Department, Omsk State Agrarian University, Omsk.

SPIN-code: 6962-3388

AuthorID (RSCI): 1068092

ORCID: 0000-0002-9743-4301

AuthorID (SCOPUS): 57223111207

Correspondence address: sn.boltovskiy@omgau.org

KUZNETSOVA Victoria Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Operation of Oil, Gas and Construction Equipment Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk.

SPIN-code: 1039-7546

AuthorID (RSCI): 1068092

ORCID: 0000-0003-3546-0894

Correspondence address: dissovetsibadi@bk.ru

KUZNETSOV Ilya Sergeevich, Senior Lecturer of the Operation of Oil, Gas and Construction Equipment Department, SibADI, Omsk.

SPIN-code: 6890-3069

AuthorID (RSCI): 1068092

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Correspondence address: ilyxa_kyznetsov@vk.com

For citations

Shimokhin A. V., Sorokin A. N., Boltovsky S. N., Kuznetsova V. N., Kuznetsov I. S. Investigation of the strength property of 3D printed products in bending deformation to optimize material distribution. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 30–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-30-37. EDN: MVIKfZ.

Received September 16, 2024.

© A. V. Shimokhin, A. N. Sorokin, S. N. Boltovsky,
V. N. Kuznetsova, I. S. Kuznetsov

Н. В. БОБКОВ¹
А. А. ФЕДОРОВ¹
С. В. ПЕТРОЧЕНКО²
Н. С. АРТЕМЕНКО¹
Р. В. ЧУЛКОВ¹

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²Научно-исследовательский институт
интеллектуального станкостроения
города Нинбо,
ООО Китайская академия машиностроения,
г. Нинбо, Китай

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110

В статье предложен метод расчета оптимальных параметров режима проволочно-электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 с использованием ротатбельного центрального композиционного плана второго порядка. Рассмотрено влияние ключевых факторов обработки, таких как время импульса, пауза между импульсами и напряжение межэлектродного зазора, на толщину дефектного слоя и время обработки. Показана возможность использования регрессионных моделей для прогнозирования параметров обработки и оптимизации их значений. Полученные результаты применимы для повышения производительности и качества обработки сложных деталей. Получен диапазон оптимальных параметров: *ON* — от 4,554 мкс до 4,932 мкс, *OFF* — от 8,842 мкс до 11 мкс и *SV* — 50 В.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, планирование эксперимента, циркониевый сплав, параметр, режимы, оптимизация, моделирование.

Введение. В современной медицине активно используются биотехнические изделия, контактирующие с тканями организма и биологическими жидкостями. Одним из основных материалов, применяемых для изготовления и покрытия подобного рода изделий, является циркониевый сплав Э110, который обладает высокими эксплуатационными характеристиками. Покрытие деталей этим сплавом делает их биосовместимыми, что расширяет возможности применения в медицине. К тому же материал отличается высокой коррозионной стойкостью и механической прочностью [1–3].

При изготовлении деталей из сплава Э110 широко используется метод проволочной электроэрозионной обработки (ПЭЭО). ПЭЭО особенно эффективна для сложных форм, твердых материалов и ситуаций, где традиционные методы оказываются сложными или малоэффективными. Одним из её преимуществ является исключение деформации поверхностей тонкостенных деталей [4].

В обзорных работах авторов [5, 6], с акцентом на параметры, способствующих повышению производительности, представлены актуальные тенденции исследований в области ПЭЭО. Кроме того, в исследовании [7] отмечается важность анализа глубины и фазового состава дефектного слоя. Этот слой формируется из-за переноса материала электрода и продуктов разложения диэлектрической жидкости на поверхность обрабатываемых изделий, что является ключевым критерием качества обработки.

Известны исследования, направленные на поиск оптимальных значений параметров режима ПЭЭО, таких как время паузы между импульсами (*OFF*), напряжение межэлектродного зазора (*SV*), время длительности импульса (*ON*), пиковый ток (*I*) и натяжение проволоки (*WT*) для достижения требуемых параметров качества обрабатываемых деталей [8], однако исследования проводились не на циркониевых сплавах.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Уровень фактора	Факторы		
	A (ON, мкс)	B (OFF, мкм)	C (SV, В)
Основной (0)	4,5	9,25	50
Интервал варьирования	2	1,75	5
Верхний (+1)	6,5	11	55
Нижний (–1)	2,5	7,5	45
В звездных точках:			
+1,68179	8,73	13	62
–1,68179	0,5	5	38

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для РЦКП второго порядка

№ опыта	Кодированные значения факторов			Отклики	
	A	B	C	t, с	h, мкм
1	–1	–1	–1	t ₁	h ₁
2	1	–1	–1	t ₂	h ₂
3	–1	1	–1	t ₃	h ₃
4	1	1	–1	t ₄	h ₄
5	–1	–1	1	t ₅	h ₅
6	1	–1	1	t ₆	h ₆
7	–1	1	1	t ₇	h ₇
8	1	1	1	t ₈	h ₈
9	–1,68179	0	0	t ₉	h ₉
10	1,68179	0	0	t ₁₀	h ₁₀
11	0	–1,68179	0	t ₁₁	h ₁₁
12	0	1,68179	0	t ₁₂	h ₁₂
13	0	0	–1,68179	t ₁₃	h ₁₃
14	0	0	1,68179	t ₁₄	h ₁₄
15	0	0	0	t ₁₅	h ₁₅
16	0	0	0	t ₁₆	h ₁₆
17	0	0	0	t ₁₇	h ₁₇
18	0	0	0	t ₁₈	h ₁₈
19	0	0	0	t ₁₉	h ₁₉
20	0	0	0	t ₂₀	h ₂₀

Свойства материалов, применяемых при электроэрозионной обработке, играют значительную роль. В работе [9] выявлена связь между теплопроводностью материала и его эрозионной стойкостью, что влияет на скорость обработки.

Для оптимизации параметров режима ПЭЭО применяются различные методы дисперсионного анализа — Analysis of variance (ANOVA). Это позволяет улучшить качество деталей, изготовленных из различных материалов, включая сплавы, суперсплавы и композиты, после их обработки методом ПЭЭО [8].

Дисперсионный анализ — это статистический метод, который используется для сравнения сред-

них значений двух или более выборок. Дисперсионный анализ является инструментом, который может использоваться в статистическом анализе для оценки влияния исследуемого фактора на зависимую переменную. Это помогает установить, является ли фактор значимым, и позволяет идентифицировать взаимодействие между переменными.

Помимо дисперсионного анализа инструментом для поиска оптимальных параметров режимов различных технологических процессов используется методология поверхностного анализа — Response surface method (RSM). Метод фокусируется на отношениях между откликом и факторами, которые являются переменными в регрессионной модели. Он помогает определить оптимальные условия для многовариантной системы.

Для проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки особенно важны точность и качество обработки поверхности. Поэтому применение дисперсионного анализа и методологии поверхностного анализа может значительно улучшить подбор оптимальных параметров для ПЭЭО [10].

Цель работы — поиск оптимальных параметров режима ПЭЭО циркониевого сплава Э110 для уменьшения глубины дефектного слоя и повышения производительности обработки.

Материалы и методы исследования. Для определения оптимальных значений технологических параметров режима электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 с целью достижения наименьшей толщины дефектного слоя при наименьшем времени обработки использовался ротатбельный центральный композиционный план (РЦКП) второго порядка [11–14].

Ротатбельные планы, как и ортогональные, являются композиционными, поскольку позволяют сохранить экспериментальную информацию, полученную с помощью полного факторного эксперимента или дробного факторного эксперимента, которую исследователь далее дополняет опытами в «звездных» точках и в центре плана.

Критерий ротатбельности является более сильным критерием оптимальности центрального композиционного плана по сравнению с критерием ортогональности. Ротатбельный план позволяет получить модель, способную предсказывать значение функции отклика с одинаковой точностью независимо от направления и на равных расстояниях от центра плана. Поэтому метод РЦКП позволяет получить более точное математическое описание технологического процесса, благодаря увеличению числа опытов в центре плана и специальному выбору величины «звездного» плеча α .

Эффективность и простота факторных экспериментов делают их наиболее часто используемыми для выбора уровней варьирования факторов и одновременного их изменения с целью изучения влияния каждого из факторов на технологический процесс [11–14]. Осуществление РЦКП второго порядка включает в себя двадцать опытов для количества факторов равного трем. Факторы, уровни, интервалы варьирования факторов и матрица планирования РЦКП второго порядка для трех факторов представлены в виде табл. 1 и табл. 2.

В качестве варьируемых факторов были выбраны следующие: время импульса ON, мкс — кодированное значение (A); пауза между импульсами OFF, мкс — кодированное значение (B), межискровый зазор SV, В — кодированное значение (C). Следующие параметры ПЭЭО — скорость промотки

Таблица 3

Результаты проведенного промышленного эксперимента

№ опыта	Кодированные значения факторов			Натуральные значения факторов			Отклики	
	A	B	C	ON, мкс	OFF, мкм	SV, В	t, с	h, мкм
1	-1	-1	-1	2,5	7,5	45	304	14
2	1	-1	-1	6,5	7,5	45	180	23
3	-1	1	-1	2,5	11	45	314	13
4	1	1	-1	6,5	11	45	138	22
5	-1	-1	1	2,5	7,5	55	347	14
6	1	-1	1	6,5	7,5	55	172	23
7	-1	1	1	2,5	11	55	407	13
8	1	1	1	6,5	11	55	180	22
9	-1,68179	0	0	0,5	9,25	50	450	10
10	1,68179	0	0	8,73	9,25	50	125	26
11	0	-1,68179	0	4,5	5	50	235	19
12	0	1,68179	0	4,5	13	50	250	18
13	0	0	-1,68179	4,5	9,25	38	206	18
14	0	0	1,68179	4,5	9,25	62	277	17
15	0	0	0	4,5	9,25	50	201	19,5
16	0	0	0	4,5	9,25	50	205	19
17	0	0	0	4,5	9,25	50	195	20,6
18	0	0	0	4,5	9,25	50	192	20
19	0	0	0	4,5	9,25	50	194	20,4
20	0	0	0	4,5	9,25	50	210	19

проволоки $WS = 13$ м/мин; давление помпы $WP = 12$ Н; натяжение проволоки $WT = 1,5$ МПа.

Ожидается, что в результате использования РЦКП второго порядка для трехфакторного эксперимента будут получены уравнения регрессии следующего вида:

$$y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{23}BC + b_{11}A^2 + b_{22}B^2 + b_{33}C^2, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ — коэффициенты уравнения регрессии.

Для получения уравнений регрессии и контурных кривых поверхностей равного отклика было использовано приложение DesignExpert13. Для графической интерпретации полученных результатов и поиска оптимальных технологических режимов электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 была использована методология поверхности равного отклика. Методология поверхности равного отклика позволяет определить взаимосвязи между входными факторами процесса и одним или несколькими измеренными откликами. Интерпретация результатов проводилась с использованием модуля дисперсионного анализа (ANOVA).

Проволочно-электроэрозионная обработка. Для проведения экспериментальных исследований использовался электроэрозионный станок Sodick VZ300L. Скорость обработки измерялась по фактическому времени работы программы, а глубина дефектного слоя определялась с помощью растрового электронного микроскопа.

Были подготовлены образцы, представляющие собой кубы размером $5\text{ мм} \times 5\text{ мм} \times 5\text{ мм}$. Материал

заготовки — циркониевый сплав марки Э110, состоящий из Zr — основа, Nb — 1 %, примесей O, Fe, Hf, Si, Ca, Cr содержание элементов не более 0,25 % (в сумме). Материал электрода-инструмента сплав, включающий в себя Cu — 65 %, Zn — 35 %. Диаметр проволоки 0,2 мм.

ПЭЭО образцов осуществлялась согласно режимам, указанным в табл. 2.

Микроструктурный анализ. После ПЭЭО циркониевых образцов с режимами, приведенными в матрице планирования, были получены микрошлифы, на которых отмечена толщина протравленного дефектного слоя. Травление производилось с помощью не характерного для циркониевых сплавов раствора 30 мл H_2O + 30 мл HNO_3 + 30 мл HCL + 30 мл HF .

Результаты проведения промышленного эксперимента и микроструктурного анализа. Результаты эксперимента приведены в табл. 3 и на рис. 1.

Исследование микрошлифов (рис. 1) позволило выявить, что с увеличением режимов обработки (увеличением параметра ON , уменьшением параметра OFF и увеличением параметра SV) уменьшается время обработки, однако это влечет за собой увеличение толщины дефектного слоя.

В ходе проведения экспериментов было получено, что с увеличением времени длительности импульса уменьшается время обработки, при этом увеличивается и толщина дефектного слоя.

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA). Важной частью любого промышленного эксперимента является оценка вклада каждого из факторов в отдельности на полученные отклики. Ниже рассмотрено влияние времени импульса (ON), паузы между импульсами (OFF) и напряжения межэлектродного зазора (SV) на отклик.

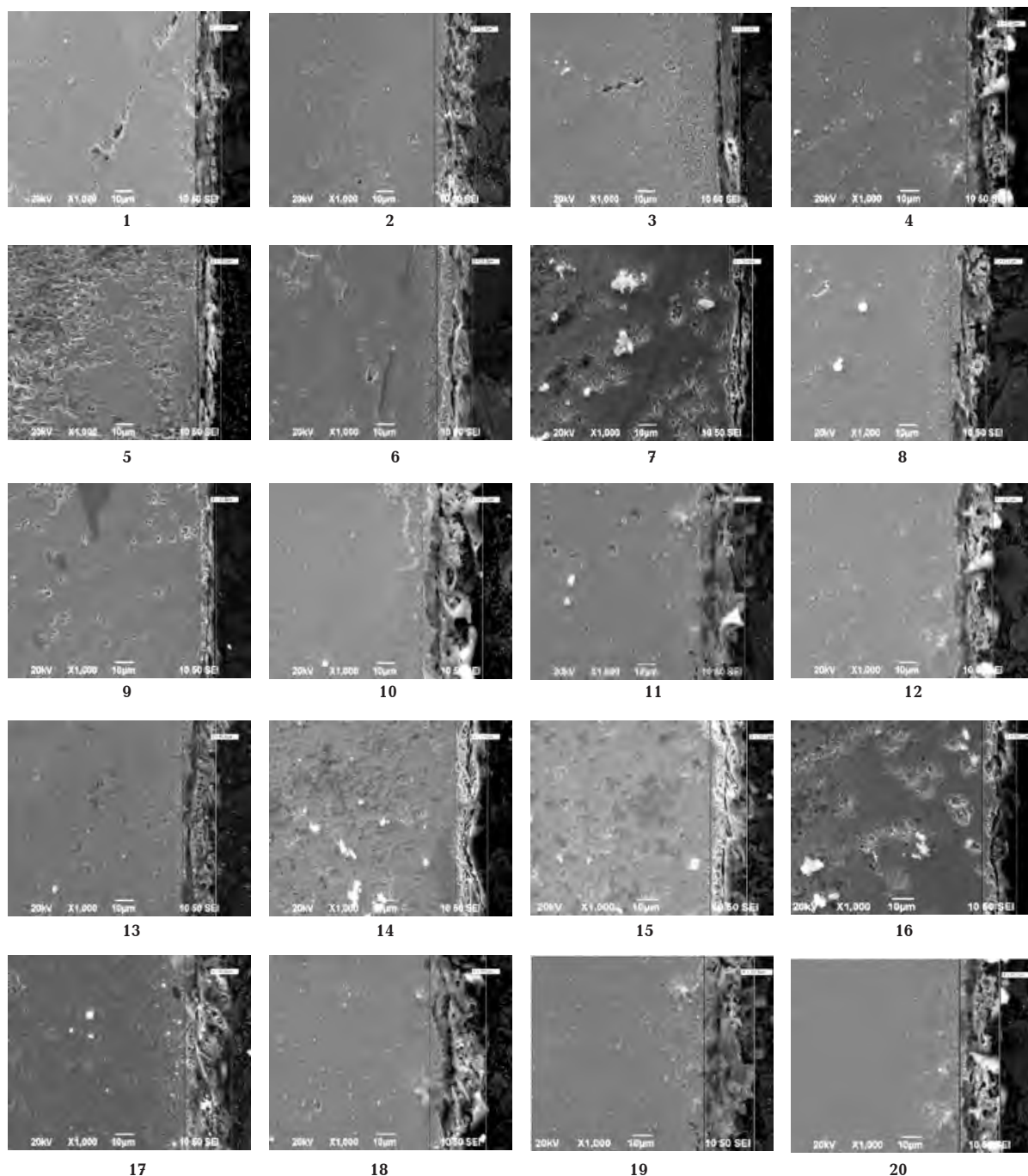


Рис. 1. Протравленные образцы с указанием толщины дефектного слоя после каждого из опытов (номер фотографии соответствует номеру опыта из табл. 3)

вого зазора (SV) на время обработки (t) и толщину дефектного слоя (h).

Чтобы оценить влияние каждого фактора в отдельности, был проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с использованием программного обеспечения для статистического анализа DesignExpert 13. Результаты ANOVA представлены в табл. 4, 5. Для каждого фактора было получено значение F -критерия и p -критерия. По величинам этих значений было сделано заключение о значимости каждого фактора в отдельности. Визуально вклад каждого фактора представлен в виде графиков на рис. 2 и рис. 3.

Анализируя данные в табл. 4 и табл. 5, а также графики на рис. 2 и рис. 3, был сделан вывод, что время обработки и толщина дефектного слоя в значительной степени зависят от времени импульса.

Так, для времени обработки значения F -критерия времени импульса составляют 1889,56 и 214,27 для фактора в первом и втором порядках соответственно, для толщины дефектного слоя значение F -критерия времени импульса составляет 941,27 для фактора в первом порядке. Кроме этого, влияние напряжения межискрового зазора (возможно, что пауза между импульсами оказывает гораздо большее влияние, чем напряжение) на время обработки оценивается как достаточно высокое. Для времени обработки значение F -критерия напряжения межискрового зазора составляет 101,52 для фактора в первом порядке.

Согласно данным, полученным в результате ANOVA, было сделано заключение, что обе регрессионные модели зависимости времени обработки (t) и глубины дефектного слоя (h) от времени импульса

Таблица 4

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для времени обработки

Факторы	Сумма квадратов	Среднеквадратичное отклонение (Meansquare)	Значение <i>F</i> -критерия (<i>F</i> -value)	Значение <i>p</i> -критерия (<i>p</i> -value)
A	1,142E+05	1,142E+05	1889,56	< 0,0001
B	274,49	274,49	4,54	0,0589
C	6132,93	6132,93	101,52	< 0,0001
AB	1352,00	1352,00	22,38	0,0008
AC	1300,50	1300,50	21,53	0,0009
BC	1250,00	1250,00	20,69	0,0011
A ²	12944,27	12944,27	214,27	< 0,0001
B ²	2848,93	2848,93	47,16	< 0,0001
C ²	2707,45	2707,45	44,82	< 0,0001

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для глубины дефектного слоя

Факторы	Сумма квадратов	Среднеквадратичное отклонение	Значение <i>F</i> -критерия	Значение <i>p</i> -критерия
A	289,78	289,78	941,27	< 0,0001
B	2,36	2,36	7,68	0,0198
C	0,2071	0,2071	0,6727	0,4312
AB	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
AC	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
BC	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
A ²	5,12	5,12	16,65	0,0022
B ²	2,54	2,54	8,24	0,0167
C ²	8,61	8,61	27,98	0,0004

(ON), паузы между импульсами (OFF) и напряжения межискрового зазора (SV) являются значимыми, поскольку значения *p*-критериев для моделей менее 0,05 и значения среднеквадратичных отклонений *R*² не ниже 0,95 (табл. 6).

После исключения всех незначимых коэффициентов уравнений регрессии со значением *p*-критерия больше 0,05 (табл. 4, табл. 5) окончательный вид уравнений выглядит следующим образом:

$$t = 199,67 - 153,76A + 35,64C - 36,77AB - 36,06AC + 35,36BC + 84,77A^2 + 39,77B^2 + 38,77C^2, \quad (2)$$

$$h = 19,75 + 7,75A - 0,6997B - 1,69A^2 - 1,19B^2 - 2,19C^2. \quad (3)$$

Полученные уравнения регрессии могут быть использованы для назначения технологических параметров режима электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 и прогнозирования влияния этих параметров на время обработки и толщину дефектного слоя.

Для перехода от кодированных значений факторов к натуральным применяются выражения:

$$ON = 4,5 + 2A, \quad (4)$$

$$OFF = 9,25 + 1,75B, \quad (5)$$

$$SV = 50 + 5C. \quad (6)$$

На рис. 4 представлены соотношения между фактическими (actual) и прогнозируемыми (predicted) значениями времени обработки и глубины дефектного слоя.

Для графической интерпретации полученных уравнений регрессии были построены контурные кривые поверхностей равного отклика для времени обработки и глубины дефектного слоя (рис. 5, рис. 6).

Анализируя рис. 5, стоит отметить, что увеличение времени импульса (ON) и увеличение паузы между импульсами (OFF) ведет за собой уменьшение времени обработки (рис. 5а, б, в). Увеличение напряжения искрового (SV) зазора влияет незначительно, однако при одновременном увеличении времени длительности импульса (ON) происходит снижение времени обработки (рис. 5г, д, е). Также, анализируя рис. 6, стоит отметить, что увеличение времени импульса ведет к увеличению толщины дефектного слоя.

Для нахождения оптимальных значений технологических параметров режима электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 были построены совмещенные контурные кривые поверхностей равного отклика (рис. 7). Численные решения представлены в виде табл. 7.

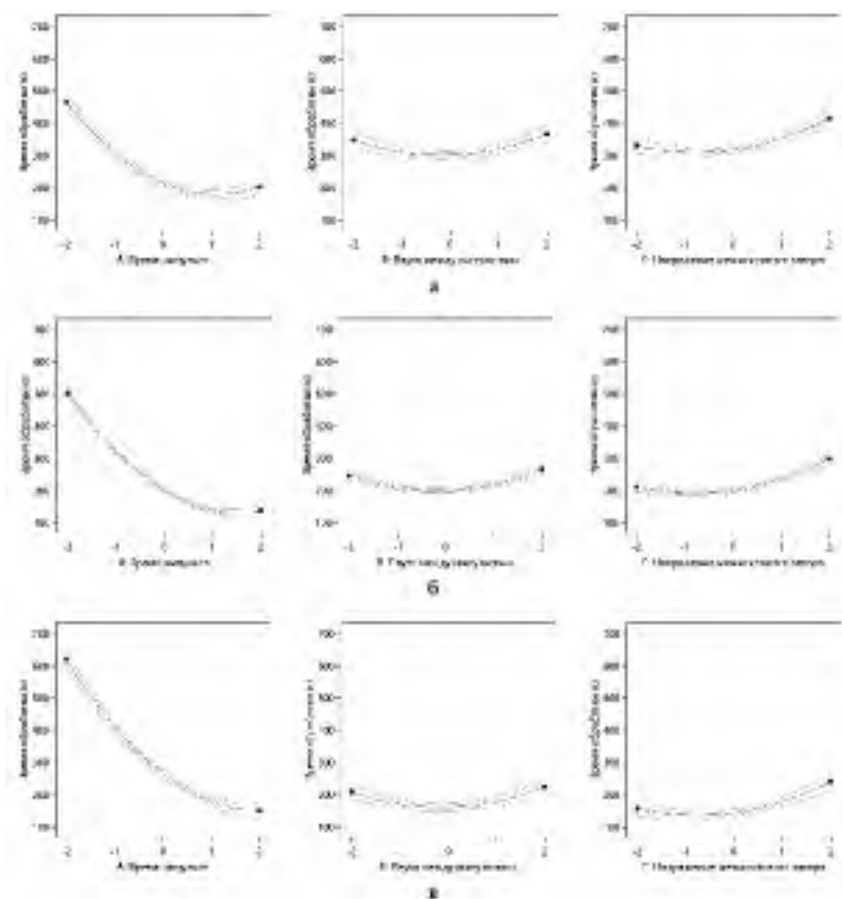


Рис. 2. Вклад каждого фактора для времени обработки:
а — при кодированных значениях факторов -1; б — при кодированных значениях факторов 0; в — при кодированных значениях факторов +1

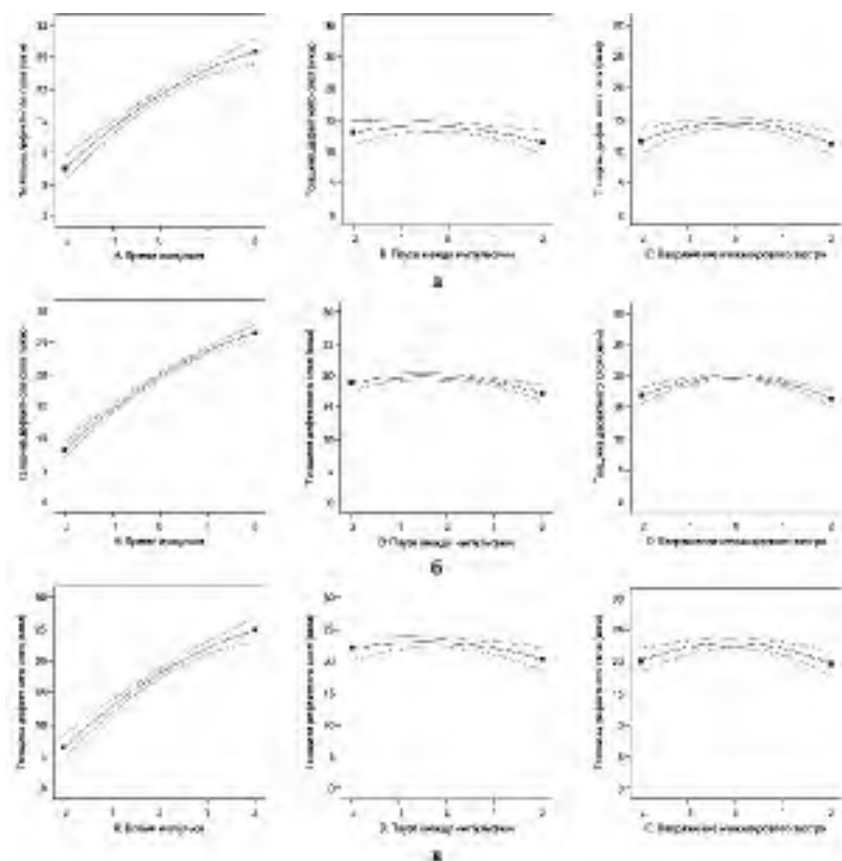
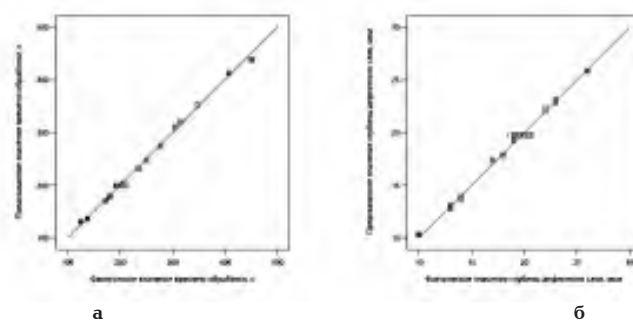
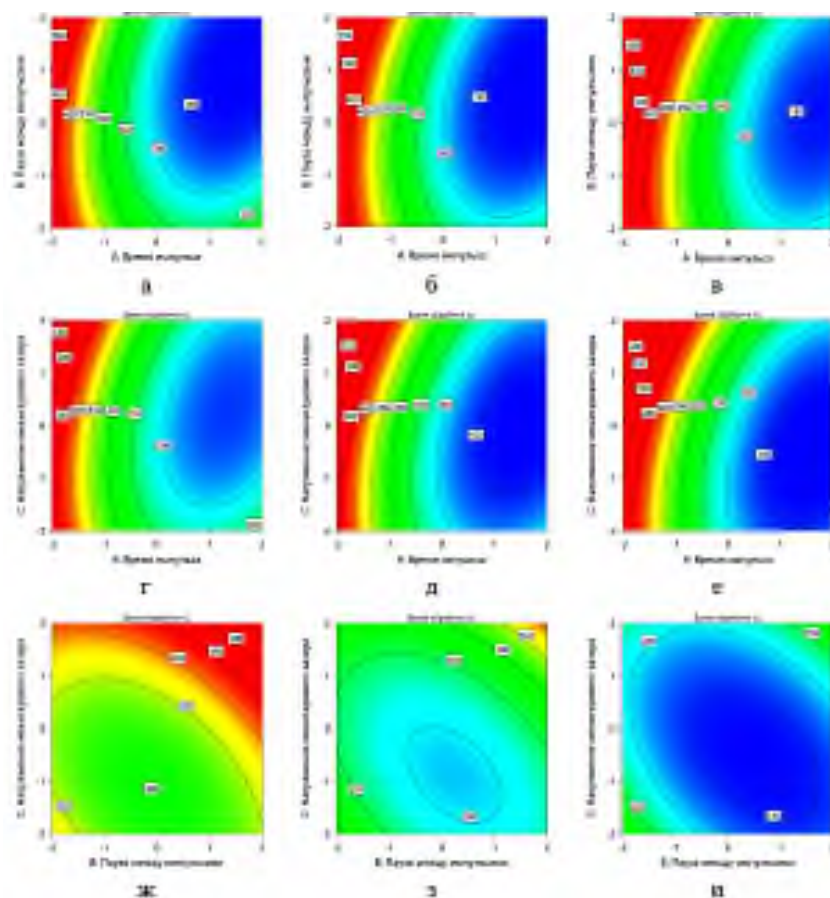


Рис. 3. Вклад каждого фактора для глубины дефектного слоя:
а — при кодированных значениях факторов -1; б — при кодированных значениях факторов 0; в — при кодированных значениях факторов +1

Результаты оценки значимости полученных уравнений регрессии

Параметр	Отклик	
	Время обработки (t)	Толщина дефектного слоя (h)
Значение p -критерия	< 0,0001	< 0,0001
Значение среднеекватичного отклонения R^2	0,9957	0,9900
Уточненное значение среднеекватичного отклонения R^2	0,9919	0,9811
Предсказанное значение среднеекватичного отклонения R^2	0,9784	0,9721
Аккуратность	55,9529	39,4910

Рис. 4. Диаграммы рассеяния:
а — для времени обработки; б — для глубины дефектного слояРис. 5. Контурные кривые поверхностей равного отклика для времени обработки:
а — фактор $C = -1$; б — фактор $C = 0$; в — фактор $C = +1$; г — фактор $B = -1$;
д — фактор $B = 0$; е — фактор $B = +1$; ж — фактор $A = -1$; з — фактор $A = 0$;
и — фактор $A = +1$

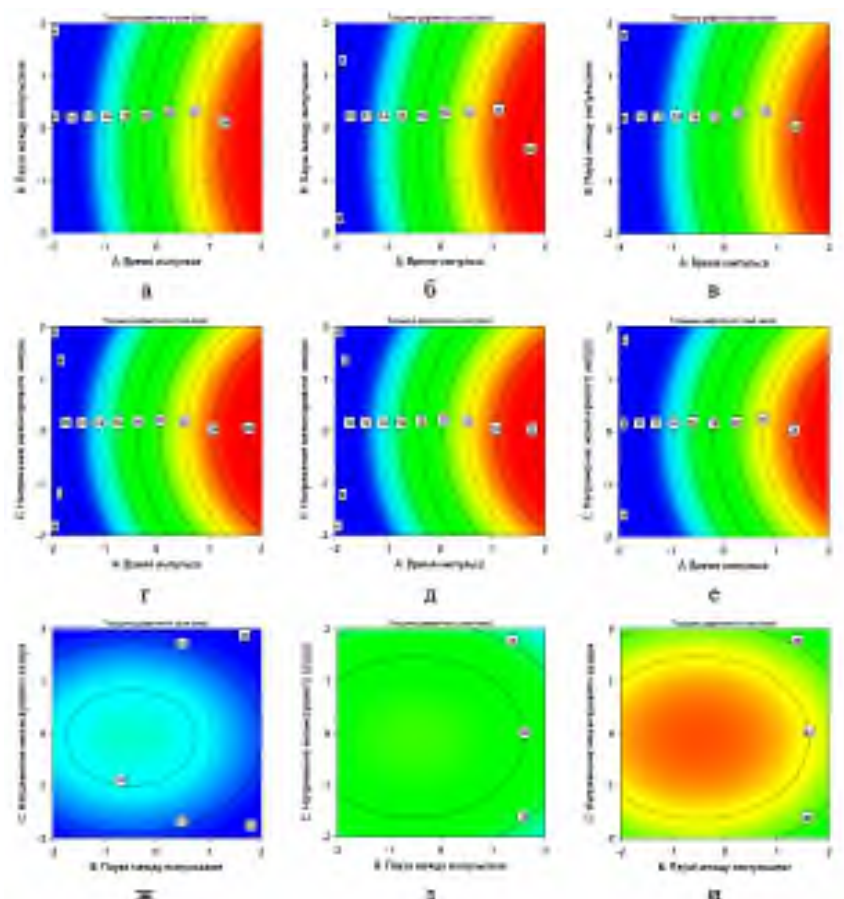


Рис. 6. Контурные кривые поверхностей равного отклика для глубины дефектного слоя: а — фактор $C = -1$; б — фактор $C = 0$; в — фактор $C = +1$; г — фактор $B = -1$; д — фактор $B = 0$; е — фактор $B = +1$; ж — фактор $A = -1$; з — фактор $A = 0$; и — фактор $A = +1$

Анализ уравнения показал, что минимально затрачиваемое на обработку время 196,052 секунд достигается при следующих кодированных значениях факторов: $ON = 0,027$; $OFF = 0,489$; $SV = 0$. В натуральных значениях: время длительности импульса $ON = 4,554$ мкс; пауза между импульсами $OFF = 10,11$ мкс; величина напряжения межэлектродного зазора $SV = 50$ В, при этом толщина дефектного слоя равна 19,8 мкм.

Эффект от применения оптимальных режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки заключается в сокращении общего времени, затрачиваемого на изготовление катодов для магнетронного распыления.

Наиболее важным критерием поиска оптимума считается толщина дефектного слоя, так как снижение толщины дефектного слоя позволит затрачивать меньше времени на финишную обработку. В результате совмещения двух графиков получен диапазон оптимальных значений параметров: $ON = 4,554 - 4,932$ мкс, $OFF = 8,842 - 11$ мкс, и $SV = 50$ В.

Стоит отметить, что для получения наименьшей толщины дефектного слоя и минимально допустимого времени обработки были рассчитаны параметры $ON = 4,6$ мкс, $OFF = 10$ мкс и $SV = 50$ В. На рис. 8 изображена толщина дефектного слоя (19,2 мкм), полученная на образце, обработанном с оптимальными параметрами. Полученные результаты свидетельствуют о расхождении математической модели с данными, полученными экспериментально, не более чем в 5 %.

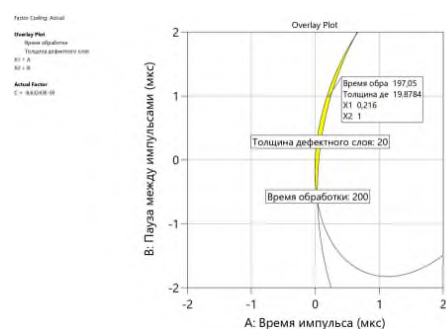


Рис. 7. Совмещенные контурные кривые поверхностей равного отклика

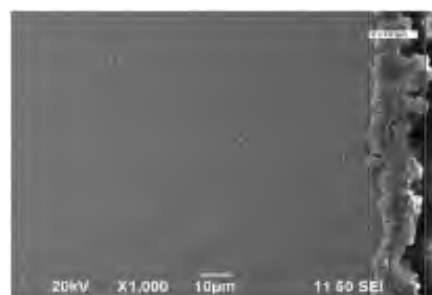


Рис. 8. Протравленный образец с указанием толщины дефектного слоя, обработанный с помощью оптимальных режимов ПЭЭО

Таблица 7

Численные решения в области поиска оптимума

Номер решения	Факторы в кодированных значениях			Отклики	
	A	B	C	Время обработки t , с	Толщина дефектного слоя h , мкм
1	0,216	1,000	0,000	197,058	19,878
2	0,209	0,977	0,000	197,006	19,877
3	0,195	0,931	0,000	196,950	19,873
4	0,187	0,903	0,000	196,942	19,869
5	0,180	0,873	0,000	196,777	19,873
6	0,122	0,641	0,000	196,560	19,863
7	0,104	0,601	0,000	197,423	19,819
8	0,129	0,743	0,000	198,227	19,790
9	0,097	0,489	0,000	196,052	19,883
10	0,047	0,112	0,000	196,065	19,910
11	0,034	−0,059	0,000	196,418	19,925
12	0,027	−0,233	0,000	197,007	19,946

Выводы. Было выявлено, что с увеличением режимов обработки (увеличением параметра *ON*, уменьшением параметра *OFF* и увеличением параметра *SV*) уменьшается время обработки, однако это влечет за собой увеличение толщины дефектного слоя. Получен диапазон оптимальных параметров: *ON* — от 4,554 мкс до 4,932 мкс, *OFF* — от 8,842 мкс до 11 мкс и *SV* — 50 В.

Определены оптимальные режимы для проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки циркониевого сплава Э110 латунным электродом-инструментом диаметром 0,2 мм, с помощью сопоставления данных, полученных в ходе сопоставления двух контурных кривых в один график. Для получения наименьшей толщины дефектного слоя и минимально допустимого времени обработки рассчитаны параметры *ON* = 4,6 мкс, *OFF* = 11 мкс и *SV* = 50 В.

После достижения наименьшей толщины дефектного слоя при наиболее высокой в данном случае скорости резания необходимо произвести удаление полученного дефектного слоя наиболее подходящим методом. Малая толщина дефектного слоя позволяет сделать вывод о том, что на финишную операцию будет затрачено немного времени.

Список источников

1. Султанов А. А., Первов Ю. Ю., Яценко А. К. Физико-химические свойства имплантатов и их взаимодействие с окружающими тканями и средами полости рта (обзор литературы) // Вятский медицинский вестник. 2019. № 2 (62). С. 80–86. EDN: WRSCOO.
2. Котенева М. В., Никулин С. А., Рожнов А. Б. Влияние условий окисления на структуру и разрушение оксидных пленок циркониевых сплавов // Прочность неоднородных структур — ПРОСТ 2018: сб. тр. IX Евразийской науч.-практ. конф. 2018. С. 182–182. EDN: XNETRB.
3. Куляшова К. С. Закономерности формирования микродуговых кальций-фосфатных биопокровов на поверхности циркония и их свойства: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2011. 162 с.
4. Попов И. С., Борисенко К. Г. Электроэрозионная обработка как один из перспективнейших методов обработки металла // Юность и Знания — Гарантия Успеха-2018: сб.

науч. тр. 5-й Междунар. молодеж. науч. конф. В 2 т. 2018. С. 259–267. Т. 2. EDN: YNESIP.

5. Siddiqui M. M. U. Z., Iqbal S. A., Zulqarnainet A. [et al.]. An investigative study on the parameters optimization of the electric discharge machining of Ti6Al4V // Clean Technologies and Recycling. 2024. Vol. 4, Issue 1. P. 43–60. DOI: 10.3934/ctr.2024003.

6. Mohanraj T., Thenarasu M., Ragaventhra B. S. [et al.]. Parameter optimization in wire electrical discharge machining using bio-inspired algorithms and response surface methodology // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2024. P. 1–28. DOI: 10.1007/s12008-024-01936-6.

7. Бобков Н. В., Федоров А. А., Полонянкин Д. А. [и др.]. Исследование влияния режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию, шероховатость и трещинообразование поверхности тугоплавких металлов // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 1. С. 148–154. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-148-154. EDN: VLXWHK.

8. Anwar H., Shather S. K., Khudhir W. S. WEDM Process Parameters Analysis and Optimization: A Review // Salud, Ciencia y Tecnología — Serie de Conferencias. 2024. №3. 860. DOI:10.56294/sctconf2024860.

9. Бобков Н. В., Федоров А. А., Бредгауэр Ю. О. [и др.]. Исследование распространения поля температур в глубь циркониевой заготовки при проволоочно-вырезной электроэрозионной обработке // Россия молодая: Передовые технологии — в промышленность. 2023. С. 25–30. DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-25-30. EDN: AIQHLM.

10. Asoo H. R., Alakali J. S., Ikya J. K. [et al.]. Historical background of RSM // Response Surface Methods — Theory, Applications and Optimization Techniques. IntechOpen, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1005302.

11. Ерунова И. Б., Ушаков И. Е. Математические аспекты формирования критериев оптимальности при планировании экспериментов // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2019. Т. 1. С. 131–133. EDN: WCNOTH.

12. Гушчин А. В. Методы планирования эксперимента и выбор групп с линейными характеристиками взаимодействия // Вестник СамГУПС. 2021. № 1(51). С. 97–103. EDN: GAXAXP.

13. Цициашвили Г. Ш., Осипова М. А., Гудименко А. И. Планирование эксперимента для оценки параметров дифференциальных уравнений по неточным наблюдениям // Вест-

ник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 1. С. 28–35. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/1/28-35. EDN: KUSYWC.

14. Giorleo L., Previtali B., Semeraro Q. Modelling of back tempering in laser hardening // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54 (9). P. 969–977. DOI:10.1007/s00170-010-3008-5.

БОБКОВ Николай Владимирович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5351-7755

AuthorID (РИНЦ): 819427

ORCID: 0000-0002-5831-282X

AuthorID (SCOPUS): 57194829384

ResearcherID: S-1503-2016

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4626-9660

AuthorID (РИНЦ): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

ПЕТРОЧЕНКО Сергей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), директор по научным исследованиям и разработкам Научно-исследова-

тельского института интеллектуального станкостроения города Нинбо, ООО Китайская академия машиностроения, г. Нинбо, Китай

SPIN-код: 3294-1488

AuthorID (РИНЦ): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

АРТЕМЕНКО Никита Сергеевич, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», инженер учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4907-4758

Адрес для переписки: dickydick89@mail.ru

ЧУЛКОВ Роман Васильевич, студент гр. КТО-231 Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.

Для цитирования

Бобков Н. В., Федоров А. А., Петроченко С. В., Артеменко Н. С., Чулков Р. В. Поиск оптимальных значений параметров режима проволоочной электроэрозионной обработки деталей из циркониевого сплава Э110 // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 38–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-38-49. EDN: YJFNSI.

Статья поступила в редакцию 11.01.2025 г.

© Н. В. Бобков, А. А. Федоров, С. В. Петроченко,
Н. С. Артеменко, Р. В. Чулков

SEARCH FOR OPTIMAL PARAMETERS OF WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF PARTS MADE FROM E110 ZIRCONIUM ALLOY

The article proposes a method for calculating rational parameters of wire electrical discharge machining of zirconium alloy E110 using a rotatable central composite design of the second order. The influence of key processing factors such as pulse duration, inter-pulse pause, and spark gap voltage on the thickness of the recast layer and machining time is examined. The feasibility of using regression models for predicting processing parameters and optimizing their values is demonstrated. The obtained results are applicable for enhancing the productivity and quality of machining complex parts in medical, aviation, and other industrial sectors.

Keywords: electrical discharge machining, experiment planning, zirconium alloy, parameter, modes, optimisation, modelling.

References

1. Sultanov A. A., Pervov Yu. Yu., Yatsenko A. K. Fiziko-khimicheskiye svoystva implantatov i ikh vzaimodeystviye s okruzhayushchimi tkanyami i sredami polosti rta (obzorliteratury) [Physical and chemical properties of implants, their interaction with surrounding tissues and environments of the oral cavity (literature review)]. Vyatskiy meditsinskiy vestnik. *Medical Newsletter of Vyatka*. 2019. No. 2 (62). P. 80–86. EDN: WRSCOO. (In Russ.).
2. Koteneva M. V., Nikulin S. A., Rozhnov A. B. Vliyaniye usloviy okisleniya na strukturu i razrusheniye oksidnykh plenok tsirkoniyevykh splavov [Influence of oxidation conditions on the structure and degradation of oxide films on zirconium alloys]. Prochnost' neodnorodnykh struktur—PROST 2018. *Strength of Heterogeneous Structures—PROST 2018*. 2018. P. 182–182. EDN: XNETRB. (In Russ.).
3. Kulyashova K. S. Zakonomernosti formirovaniya mikrodogovykh kal'tsiy-fosfatnykh biopokrytiy na poverkhnosti tsirkoniya i ikh svoystva [Regularities in the formation of micro arc calcium phosphate bio coatings on zirconium surface and their properties]. Tomsk, 2011. 162 p. (In Russ.).
4. Popov I. S., Borisenko K. G. Elektroerozionnaya obrabotka kak odin iz perspektivneyshikh metodov obrabotki metalla [Electrical discharge machining as one of the most promising methods for metal processing]. Yunost' i Znaniya — Garantiya Uspekha-2018. *Youth and Knowledge — Guarantee of Success-2018*. In 2 vols. 2018. Vol. 2. P. 259–267. EDN: YNESIP. (In Russ.).
5. Siddiqui M. M. U. Z., Iqbal S. A., Zulqarnainet A. [et al.]. An investigative study on the parameters optimization of the electric discharge machining of Ti6Al4V. *Clean Technologies and Recycling*. 2024. Vol. 4, Issue 1. P. 43–60. DOI: 10.3934/ctr.2024003. (In Engl.).
6. Mohanraj T., Thenarasu M., Ragaventhra B. S. [et al.]. Parameter optimization in wire electrical discharge machining using bio-inspired algorithms and response surface methodology. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IIJDeM)*. 2024. P. 1–28. DOI: 10.1007/s12008-024-01936-6. (In Engl.).
7. Bobkov N. V., Fedorov A. A., Polonyankin D. A. [et al.]. Issledovaniye vliyaniya rezhimov provolочно-vyreznoy elektroerozionnoy obrabotki na morfologiyu, sherokhovatost' i treshchinoobrazovaniye poverkhnosti tugoplavkikh metallov [Investigation of the influence of EDM on morphology, roughness and cracking of surfaces of refractory metals]. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018. Vol. 6, no. 1. P. 148–154. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-148-154. EDN: VLXWHK. (In Russ.).
8. Anwar H., Shather S. K., Khudhir W. S. WEDM Process Parameters Analysis and Optimization: A Review. *Salud, Ciencia y Tecnología — Serie de Conferencias*. 2024. No. 3. 860. DOI: 10.56294/sctsonf2024860. (In Engl.).
9. Bobkov N. V., Fedorov A. A., Bredgauer Yu. O. [et al.]. Issledovaniye rasprostraneniya polya temperature vglub' tsirkoniyevoy zagotovki pri provolочно-vyreznoy elektroerozionnoy obrabotke [Study of temperature field propagation into zirconium billet during wire-cut EDM]. *Rossiya*

Molodaya: Peredovyye Tekhnologii — v Promyshlennost'. 2023. P. 25–30. DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-25-30. EDN: AIQHLM. (In Russ.).

10. Asoo H. R., Alakali J. S., Ikya J. K. [et al.]. Historical background of RSM // Response Surface Methods—Theory, Applications and Optimization Techniques. IntechOpen, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1005302. (In Engl.).

11. Erunova I. B., Ushakov I. E. Matematicheskiye aspekty formirovaniya kriteriyev optimal'nosti pri planirovanii eksperimentov [Mathematical aspects of the formation of optimality criteria in the planning of experiments]. Sovremennoye obrazovaniye: sodержaniye, tekhnologii, kachestvo. *Modern Education: Content, Technologies, Quality*. 2019. Vol. 1. P. 131–133. EDN: WCNOTH. (In Russ.).

12. Gushchin A. V. Metody planirovaniya eksperimenta i izbor grupp s lineynymi kharakteristikami vzaimodeystviya [Methods of experiment planning and selection of groups with linear interaction characteristics]. *Vestnik SamGUPS*. 2021. No. 1(51). P. 97–103. EDN: GAXAXP. (In Russ.).

13. Tsitsiashvili G. Sh., Osipova M. A., Gudimenko A. I. Planirovaniye eksperimenta dlya otsenki parametrov differentsial'nykh uravneniy po netochnym nablyudeniyam [Planning an experiment to estimate the parameters of differential equations based on inaccurate observations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii. Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2024. No. 1. P. 28–35. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2024/1/28-35. EDN: KUSYWC. (In Russ.).

14. Giorleo L., Previtali B., Semeraro Q. Modelling of back tempering in laser hardening // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54 (9). P. 969–977. DOI: 10.1007/s00170-010-3008-5. (In Engl.).

BOBKOV Nikolay Vladimirovich, Senior Lecturer of the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5351-7755

AuthorID (RSCI): 819427

ORCID: 0000-0002-5831-282X

AuthorID (SCOPUS): 57194829384

ResearcherID: S-1503-2016

FEDOROV Aleksey Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4626-9660

AuthorID (RSCI): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

PETROCHENKO Sergei Valeryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, R&D Director of Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd. of China National Machinery Industry Institute Group, Ningbo, China.

SPIN-code: 3294-1488

AuthorID (RSCI): 648136

ORCID: 0000-0001-5600-835X

AuthorID (SCOPUS): 57983962200

ResearcherID: A-8009-2014

ARTEMENKO Nikita Sergeyevich, Graduate Student of the Metal Cutting Machines and Tools Department, Engineer at the «Modern Manufacturing Technologies» Research and Production Center, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4907-4758

Correspondence address: dickydick89@mail.ru

CHULKOV Roman Vasilyevich, Student at gr. KTO-231 of the Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

For citations

Bobkov N. V., Fedorov A. A., Petrochenko S. V., Artemenko N. S., Chulkov R. V. Search for optimal parameters of wire electrical discharge machining of parts made from E110 zirconium alloy. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 38–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-38-49. EDN: YJFNSI.

Received January 11, 2025.

© N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, S. V. Petrochenko,
N. S. Artemenko, R. V. Chulkov

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.31
DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-50-57
EDN: MNEKEO

В. В. СУШКОВ¹
В. Н. ГОРЮНОВ²
Е. Е. РЕВЯКИН¹

¹Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень

²Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ С СИСТЕМОЙ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В работе представлен структурный синтез системы автоматического регулирования сетевого инвертора системы накопления электроэнергии, в основу которого положена известная методика синтеза системы подчинённого регулирования. Целью работы является повышение эффективности электротехнической системы буровой установки с системой накопления электроэнергии при резкопеременном характере нагрузки. Для этого решается задача корректного определения коэффициентов регуляторов системы автоматического регулирования сетевого инвертора, что достигается применением существующей методики синтеза системы подчинённого регулирования. Данная методика позволяет выбрать коэффициенты регуляторов на основе аналитических выводов, что устраняет неопределённость при практической реализации системы автоматического регулирования сетевого инвертора.

Ключевые слова: буровая установка, сетевой инвертор, система накопления электроэнергии, система автоматического регулирования, система подчинённого регулирования, резкопеременная нагрузка.

Введение. При разработке нефтегазовых месторождений в процессе бурения скважин происходят колебания электрической мощности и тока (рис. 1), связанные с технологией бурения скважины, что может привести к отключению источника питания электротехнической системы буровой установки (ЭТС БУ) средствами релейной защиты и автоматики из-за резкого снижения напряжения и частоты [1].

Нижняя граница каждого столбика графика (рис. 1) соответствует величине минимального тока, а верхняя граница — величине максимального тока, потребляемого буровой установкой. Как видно, величина тока изменяется в широких пределах в течение суток: от 30 А до 130 А в среднем (значение тока приведено к напряжению 6 кВ). При заклинивании бура происходит увеличение потребляемого тока до 400–750 А. Из графика видно, что после

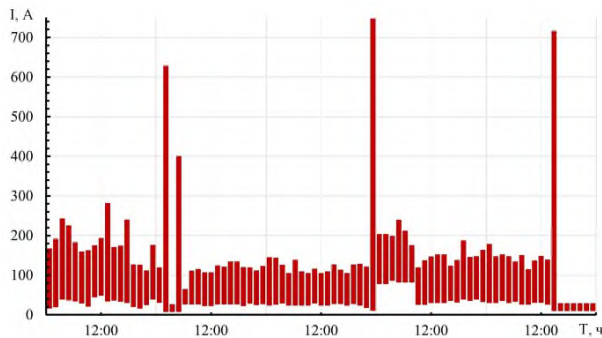


Рис. 1. Усредненные значения тока, потребляемого буровой установкой

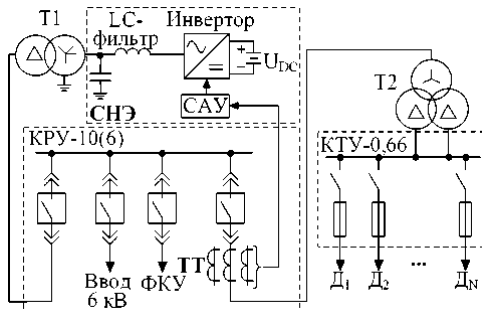


Рис. 2. Упрощенная однолинейная схема электроснабжения буровой установки с системой накопления электроэнергии

увеличения тока до таких значений буровая установка может отключиться от сети.

В настоящее время для обеспечения надёжного электроснабжения буровых установок производители электротехнического оборудования предлагают технические решения, основанные на системах накопления электроэнергии (СНЭ). Система накопления представляет собой технический комплекс, осуществляющий преобразование энергии, накопленной в электрохимических (литий-ионные аккумуляторные батареи) или в электромагнитных аккумуляторах (суперконденсаторы), в электроэнергию переменного тока промышленной частоты [2]. Система способна сглаживать резкие изменения электрической мощности быстрее, чем основной источник питания, предотвращая снижение напряжения и частоты у потребителя [3, 4], что значительно снижает расходы на эксплуатацию ЭТС [5]. Такая манёвренность возможна благодаря использованию современных полупроводниковых ключей сетевого инвертора, являющегося частью комплекса СНЭ. Один из вариантов подключения СНЭ к системе электроснабжения буровой установки показан на рис. 2.

Использование СНЭ в задачах балансирования мощности ЭТС сводится к выдаче управляющего воздействия на СНЭ по отклонению какого-либо режимного параметра, например, частоты напряжения [6]. Срезание пиков мощности ЭТС БУ удобно осуществлять по факту изменения значения тока. При увеличении потребляемой мощности фидерами КТУ увеличивается ток, протекающий по линии от КРУ к КТУ (рис. 2). Значение данного тока измеряется трансформатором тока ТТ, установленным в ячейке выключателя линии. Вторичный сигнал ТТ поступает в систему автоматического управле-

ния СНЭ, где формируется задание для системы автоматического регулирования (САР) сетевого инвертора СНЭ. Система регулирования обрабатывает задание, для чего формирует закон управления ключами сетевого инвертора. Обработка задания выполняется регуляторами САР инвертора.

Анализ отечественных научных источников показывает [6–8], что вопрос формализации процесса настройки регуляторов САР сетевого инвертора остаётся недостаточно проработанным. Обычно упор делается на оптимизацию работы основного генерирующего оборудования [8] либо на разработку способов и алгоритмов управления СНЭ [6, 7]. В зарубежной литературе задача настройки регуляторов сетевого инвертора рассмотрена подробнее и решается с помощью метода распределения корней на комплексной плоскости [9–11]. Однако в структуре САР игнорируются передаточные звенья фильтров, а также не учитывается фактическое расположение компенсирующих обратных связей относительно регулятора.

Корректная настройка системы регулирования имеет критическое значение, так как она влияет на длительность переходного процесса и на пере-регулирование тока, выдаваемого инвертором. При использовании СНЭ для стабилизации электроснабжения буровых установок некорректная настройка системы регулирования ведомого инвертора приведёт к снижению его эффективности.

Наиболее близкое исследование приведено в работе [12], где разрабатывается система компенсации пиковых значений тока в звене постоянного тока преобразователя частоты системы электропривода транспорта и приводится синтез регулятора тока DC/DC преобразователя. В текущей работе предлагается использовать существующую [13] методику синтеза системы подчиненного регулирования применительно к САР сетевого инвертора (DC/AC преобразователя) системы накопления электроэнергии ЭТС БУ.

Краткое описание методики. В основе построения системы подчинённого регулирования лежит представление объекта регулирования в виде последовательно соединённых звеньев, выходными величинами которых оказываются физические величины, представляющие интерес с точки зрения регулирования. САР строится следующим образом:

1. На входе объекта устанавливается фильтр, ограничивающий полосу пропускания, с некомпенсируемой постоянной времени:

$$W_\phi = \frac{1}{T_\phi p + 1}. \quad (1)$$

2. Для каждой из регулируемых величин предусматривается замкнутый контур с регулятором по отклонению. Передаточная функция регулятора определяется формулой:

$$P_i(p) = [W_i(p)]^{-1} \frac{1}{2^i T_u p} \quad , \quad (2)$$

где $W_i(p)$ — передаточная функция компенсируемого звена объекта регулирования, i — порядковый номер контура, T_μ — базовая некомпенсируемая постоянная времени.

3. Полученная структурная схема преобразуется к виду, приближенному к её практической реализации.

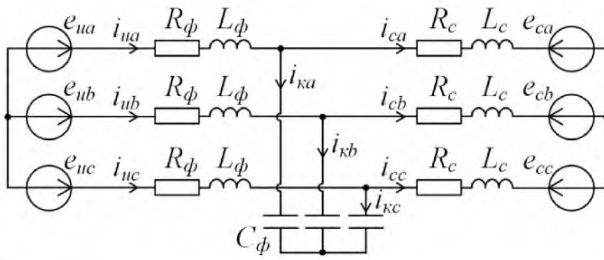


Рис. 3. Схема замещения силовой части сетевого инвертора

Математическое описание сетевого инвертора.

Схема замещения (рис. 3) и её математическое описание составлены при следующих допущениях:

- источник постоянного напряжения (система аккумуляторов) сохраняет номинальное напряжение при разряде [14];
- активным сопротивлением в цепи конденсатора фильтра пренебрегаем;
- работу СНЭ рассматриваем на основной гармонике [14];
- внешняя сеть представлена источником мощности с постоянным сопротивлением.

На рис. 3 введены следующие буквенные обозначения: e_u — основная гармоника фазного напряжения на выводах инвертора; i_u — мгновенное значение тока в фазе дросселя синусного фильтра; R_ϕ — активное сопротивление дросселя синусного фильтра; L_ϕ — индуктивность дросселя синусного фильтра; C_ϕ — ёмкость конденсатора синусного фильтра; i_k — мгновенное значение тока через фазу конденсаторной батареи; i_c — мгновенное значение отфильтрованного тока инвертора, протекающего от синусного фильтра в сеть; R_c — активное сопротивление системы в точке подключения инвертора; L_c — индуктивность системы в точке подключения инвертора; e_c — основная гармоника фазного напряжения системы.

В неподвижной системе координат уравнения, составленные по законам Кирхгофа, для схемы (рис. 3) выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} L_\phi \frac{d\tilde{i}_u^{(af)}}{dt} + R_\phi \tilde{i}_u^{(af)} = \tilde{e}_u^{(af)} - \tilde{u}_k^{(af)} \\ L_c \frac{d\tilde{i}_c^{(af)}}{dt} + R_c \tilde{i}_c^{(af)} = -\tilde{e}_c^{(af)} + \tilde{u}_k^{(af)} \\ C_\phi \frac{d\tilde{u}_k^{(af)}}{dt} = \tilde{i}_u^{(af)} - \tilde{i}_c^{(af)} \end{cases} \quad (3)$$

САР инвертора строится во вращающихся координатах, а её синтез проводится по передаточной функции объекта регулирования. Уравнения (3), записанные в системе координат вращающейся с частотой основной гармоники, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} L_\phi \frac{d\tilde{i}_u^{(xy)}}{dt} + j\omega L_\phi \tilde{i}_u^{(xy)} + R_\phi \tilde{i}_u^{(xy)} = \tilde{e}_u^{(xy)} - \tilde{u}_k^{(xy)} \\ L_c \frac{d\tilde{i}_c^{(xy)}}{dt} + j\omega L_c \tilde{i}_c^{(xy)} + R_c \tilde{i}_c^{(xy)} = -\tilde{e}_c^{(xy)} + \tilde{u}_k^{(xy)} \\ C_\phi \frac{d\tilde{u}_k^{(xy)}}{dt} + j\omega C_\phi \tilde{u}_k^{(xy)} = \tilde{i}_u^{(xy)} - \tilde{i}_c^{(xy)} \end{cases} \quad (4)$$

В алгебраической форме записи система (4) с разделением на вещественную и мнимую части примет вид:

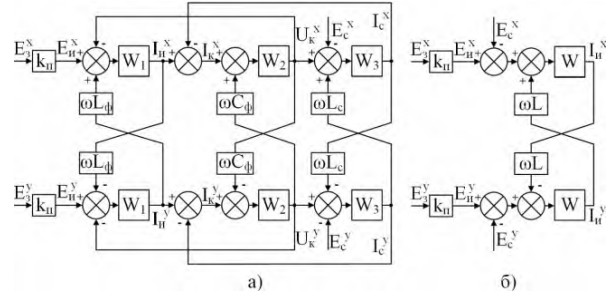


Рис. 4. Структурная схема объекта регулирования

$$\begin{cases} I_u^x = \frac{1}{pL_\phi + R_\phi} (E_u^x + \omega L_\phi I_v^y - U_k^x) \\ I_c^x = \frac{1}{pL_c + R_c} (U_k^x - E_c^x + \omega L_c I_c^y) \\ U_k^x = \frac{1}{pC_\phi} (I_u^x - I_c^x + \omega C_\phi U_k^y) \\ I_u^y = \frac{1}{pL_\phi + R_\phi} (\tilde{E}_u^y - U_k^y - \omega L_\phi I_u^x) \\ I_c^y = \frac{1}{pL_c + R_c} (U_k^y - E_c^y - \omega L_c I_c^x) \\ U_k^y = \frac{1}{pC_\phi} (I_u^y - I_c^y - \omega C_\phi U_k^x) \end{cases} \quad (5)$$

На основе системы уравнений (5) строится структурная схема объекта регулирования (рис. 4а).

Синтез САР сетевого инвертора. Объект регулирования (рис. 4а) содержит три последовательно соединенных звена:

$$W_1 = \frac{1}{pL_\phi + R_\phi}, W_2 = \frac{1}{pC_\phi} \text{ и } W_3 = \frac{1}{pL_c + R_c}$$

с тремя выходными величинами, каждая из которых может быть замкнута на отдельный регулятор в САР. Однако в научно-технической литературе САР ведомого сетью инвертора выполняется одноконтурной. Такое допущение возможно, так как мощность, потребляемая конденсатором синусного фильтра, выбирается в диапазоне 2–4 % от мощности инвертора. Соответственно, ток i_k относительно мал и им можно пренебречь. Тогда схема замещения (рис. 3) инвертора становится одноконтурной, а система уравнений (3) преобразуется к одному выражению. При этом структурная схема объекта регулирования примет простейший вид (рис. 4б).

На схеме (рис. 4б) приняты следующие обозначения:

$$W = \frac{k}{pT + 1},$$

где $k = R^{-1}$; $T = LR^{-1}$; $R = R_\phi + R_c$; $L = L_\phi + L_c$; k_π — коэффициент усиления инвертора.

В упрощенной схеме имеется лишь одно звено, постоянная времени которого подлежит компенсации. Поэтому САР для каждой из двух координат будет одноконтурной с одним регулятором (рис. 5а).

В изображенной САР (рис. 5а) учтены компенсирующие связи по возмущению и компенсирующие перекрёстные связи. В соответствии с п. 1 методики на вход объекта регулирования ставится звено фильтра с некомпенсируемой постоянной времени

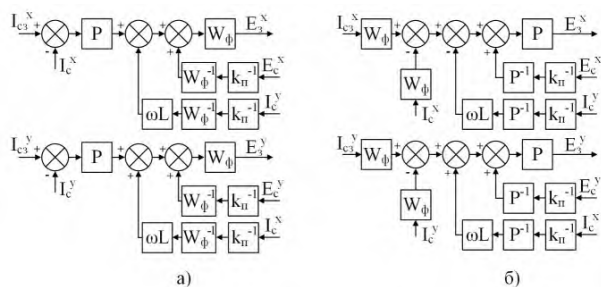


Рис. 5. Структурная схема САР ведомого сетью инвертора

T_μ , передаточная функция которого описывается выражением (1). В соответствии с п. 2 методики передаточная функция регулятора будет иметь следующий вид:

$$P^{xy} = [k_n \cdot W(p)]^{-1} \frac{1}{2T_\mu p} = \frac{Tp + 1}{2k_n k T_\mu p} = \frac{T}{2k_n k T_\mu} + \frac{1}{2k_n k T_\mu p}.$$

Как видно, регулятор имеет структуру ПИ-регулятора. Пропорциональный и интегральный коэффициенты определяются параметрами силовой части объекта, а также некомпенсированной постоянной времени T_μ .

В научно-технической литературе [7] при описании САР инвертора не учитывают передаточную функцию фильтра W_ϕ , что приводит к неопределённости при выборе коэффициентов регуляторов. Методика синтеза САР и её настройки на модальный оптимум позволяет эту неопределённость устранить.

Теперь, в соответствии с п. 3 методики, следует выполнить преобразования структуры САР (рис. 5б).

Во-первых, следует перенести сумматоры компенсирующих связей на вход ПИ-регулятора. Во-вторых, необходимо изменить передаточные функции компенсирующих связей. Нетрудно увидеть (рис. 5а), что в компенсационном канале присутствуют чисто дифференцирующие звенья:

$$W_\phi^{-1} = T_\mu p + 1.$$

Наличие этих звеньев нарушает принцип физической реализуемости системы. Для устранения этих звеньев введём в каналы компенсирующих связей звено с передаточной функцией W_ϕ . Для того, чтобы результирующая передаточная функция системы не изменилась, необходимо также ввести в прямой тракт САР звенья, компенсирующие новое звено. Также перенесём звено W_ϕ в канал задания и канал главной обратной связи по регулируемой величине.

Как видно (рис. 5б), в каналах обратных связей остались звенья, передаточные функции которых не противоречат принципу физической реализуемости. Кроме того, эти звенья выполняют функцию фильтрации измеряемого сигнала. Структурные преобразования привели к исключению фильтра W_ϕ из прямого тракта САР и переносу этого фильтра в канал задания и канал главной обратной связи, что более оправданно с точки зрения помехоустойчивости системы. Совокупность полученной САР (рис. 5б) и упрощенной структурной схемы (рис. 4б) даст нормируемую передаточную функцию по управлению:

$$W_0 = \frac{1}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1}.$$

Моделирование и анализ результатов. Для анализа качества работы САР было проведено моделирование переходного процесса управляемой величины при ступенчатом изменении сигнала задания. Имитационная модель, разработанная в ПК Matlab/Simulink, изображена на рис. 6.

Параметры элементов модели (рис. 6), приведенные к напряжению 0,4 кВ, следующие:

- напряжение звена постоянного тока, рассчитанное на генерацию мощности, соответствующей выдаче в сеть тока 750 А: $U_{dc} = 785$ В;
- параметры дросселя и конденсатора sinusного фильтра инвертора: $L_\phi = 0,3$ мГн, $R_\phi = 0,022$ Ом, $C_\phi = 270$ мкФ;
- параметры обмоток силового трансформатора ТМ-630/6, рассчитанные по паспортным дан-

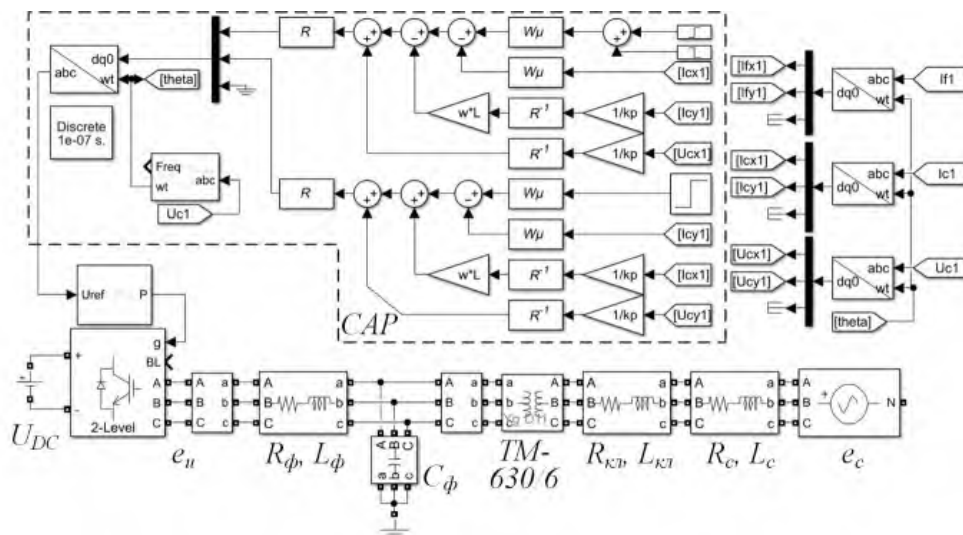


Рис. 6. Имитационная модель сетевого инвертора

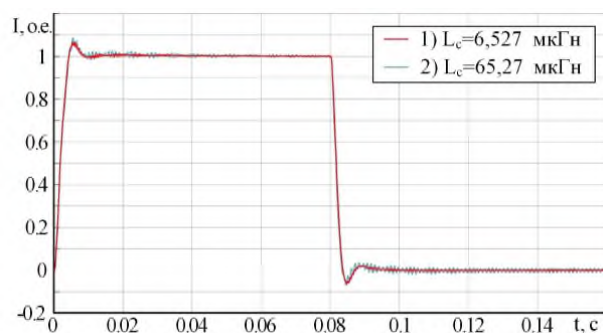


Рис. 7. Изменение тока инвертора при ступенчатом задающем воздействии

Таблица 1

Показатели	Нормируемые значения	Зависимость 1 $L_c = 6,527$ мкГн	Зависимость 2 $L_c = 65,27$ мкГн
Время первого согласования	0,0047 с (4,7 T_μ)	0,0043 с	0,0043 с
Время достижения максимума	0,00628 с (6,28 T_μ)	0,0058 с	0,0055 с
Время достижения 5 % зоны отклонения	0,0041 с (4,1 T_μ)	0,0038 с	0,0041 с
Время достижения 1 % зоны отклонения	0,008 с (8 T_μ)	0,008 с	0,0084 с
Перерегулирование	4,3 %	6,69 %	8,62 %

ным ($S_n = 630$ кВА, $u_{кз\%} = 5,5$ %, $\Delta P_{кз} = 6,75$ кВт, $P_{xx} = 0,8$ кВт, $I_{xx} = 2$ %): $R_{nn} = R_{вн} = 1,36$ мОм, $L_{nn} = L_{вн} = 21,8$ мкГн;

— параметры кабельной линии, соединяющей силовой трансформатор и шины 6 кВ: $R_{ка} = 0,453$ мОм, $L_{ка} = 0,246$ мкГн;

— параметры системы: $L_c = 6,527$ мкГн, $R_c = 0,0036$ Ом, $E_c = 242$ В.

В модели (рис. 6) учитывается нелинейность, вносимая дискретностью работы инвертора, а также учитывается работа системы фазовой автоподстройки частоты.

Полученные графики (рис. 7) переходного процесса управляемой величины позволяют судить о качестве работы разработанной САР СНЭ для буровой установки.

На рис. 7 показаны зависимости тока I_c инвертора от времени при изменении уставки от 0 А до 750 А в начальный момент и от 750 А до 0 А в момент времени 0,08 с. Зависимости 1 и 2 показывают изменение тока инвертора при индуктивности внешней сети $L_c = 6,527$ мкГн и $L_c = 65,27$ мкГн соответственно. Изменение индуктивности внешней системы может быть обусловлено изменением числа работающих генераторов и двигателей буровой установки или переключением на внешнее электропитание. При этом регуляторы САР инвертора настроены на первоначальный режим. Численные показатели качества переходного процесса [8] приведены в табл. 1.

По виду зависимости 1 (рис. 7) и численным показателям качества (табл. 1) можно сделать вывод о том, что большая часть показателей находится в пределах нормируемых значений. Наибольшее

отклонение наблюдается по перерегулированию и составляет 2,39 %, что объясняется отличием передаточной функции имитационной модели (рис. 6) от нормируемой передаточной функции. Следовательно, настройка регуляторов САР произведена корректно.

При изменении сопротивления внешней сети качество переходного процесса изменения тока инвертора снижается. Наибольшее отклонение наблюдается по перерегулированию (табл. 1) и составляет 4,32 %. Также в графике изменения тока (рис. 7) появляются колебания. Увеличение перерегулирования будет приводить к более быстрому износу аккумуляторных батарей, а наличие колебаний тока — к появлению высших гармонических составляющих в напряжении. Эти факторы негативно сказываются на энергоэффективности электротехнической системы буровой установки с системой накопления электроэнергии.

Вывод. В работе была решена задача корректного определения коэффициентов регуляторов САР инвертора СНЭ, работающего в составе ЭТС БУ. Полученные результаты показывают, что эффективность использования СНЭ для компенсации пиковых значений мощности ЭТС БУ может быть достигнута только при фиксированных значениях сопротивления и напряжения внешней сети, что является практически невозможным условием. При этом настройка регулятора САР инвертора осуществляется как на основе параметров внешней сети, так и на основе параметров СНЭ. Данное обстоятельство необходимо учитывать при расчете коэффициентов регуляторов. Окончательное решение задачи можно осуществить применением адаптивных регуляторов в структуре САР СНЭ.

Список источников

- Газизова О. В., Морщак А. Э., Варганов Д. Е. [и др.]. Разработка мероприятий по обеспечению устойчивости промышленной электростанции с резкопеременной нагрузкой // Электротехнические системы и комплексы. 2024. № 1(62). С. 26–32. DOI: 10.18503/2311-8318-2024-1(62)-26-32. EDN: MTLZLU.
- Разживин И. А., Суворов А. А., Андреев М. В. [и др.]. Обзор математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть I // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. № 2. С. 58–80. DOI: 10.31857/S000233102302005X. EDN: JZJZSY.
- Косарев Б. А., Кошук Г. А., Лазарев Д. В. [и др.]. Способы поддержания значений напряжения и частоты в допустимых пределах в условиях распределенной генерации при резкопеременном характере нагрузки потребителя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. Т. 19, № 3. С. 64–73. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73. EDN: NZWJYZ.
- Бачурин П. А., Гладков Д. С., Зырянов В. М. [и др.]. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2 (59). С. 18–25. EDN: WFLZYQ.
- Engels J., Claessens B., Deconinck G. Optimal combination of frequency control and peak shaving with battery storage systems // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11, № 4. P. 3270–3279. DOI: 10.1109/TSG.2019.2963098.
- Илюшин П. В., Куликов А. А., Березовский П. К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты //

Релейная защита и автоматизация. 2019. № 4(37). С. 26–33. EDN: JSSGMJ.

7. Червонченко С. С., Фролов В. Я. Повышение энергоэффективности автономной системы электроснабжения буровой установки при провалах напряжения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 470–478. EDN: MGAPVA.

8. Федотов А. И., Федотов Е. А., Абдуллазянов А. Ф. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 3–17. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. EDN: BITFGX.

9. Ashtiani N. A., Ali Khajehoddin S., Karimi-Ghartemani M. Optimal design of nested current and voltage loops in grid-connected inverters // 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, 2020. P. 2397–2402. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124405.

10. Zhao Z., Han Z., Liu X. [et al.]. Optimal Tuning of the Current Loop for Dual-Loop Controlled Grid-Forming Converters Based on Active Damping Optimization // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 35801–35813. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061098.

11. Yan W., Shah S., Gevorgian V., Gao D. W. Sequence Impedance Modeling of Grid-Forming Inverters // 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Washington, 2021. P. 1–5.

12. Плотников Ю. В., Поляков В. Н., Савосина А. А., Щербачев Д. А. Сглаживание пиковых нагрузок в частотно-регулируемом электроприводе трамвая с системой хранения энергии на базе суперконденсаторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. Т. 67, № 1. С. 21–35. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-21-35. EDN: MYQWKT.

13. Шрейнер Р. Т. Системы подчинённого регулирования электроприводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчинённым регулированием координат. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997. 279 с.

14. Разживин И. А., Суворов А. А., Андреев М. В. [и др.]. Обзор математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть II //

Известия Российской академии наук. Энергетика. 2023. № 3. С. 34–56. DOI: 10.31857/S000233102303007X. EDN: TBVYWM.

СУШКОВ Валерий Валентинович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроэнергетика» Тюменского индустриального университета (ТИУ), г. Тюмень.

SPIN-код: 1060-8949

AuthorID (РИНЦ): 446636

AuthorID (SCOPUS): 55971218900

Адрес для переписки: sushkovvv@gray-nv.ru

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

РЕВЯКИН Егор Евгеньевич, ассистент кафедры «Электроэнергетика» ТИУ, г. Тюмень.

SPIN-код: 3627-6031

AuthorID (РИНЦ): 1097835

Адрес для переписки: revyakin.egor.ev@gmail.com

Для цитирования

Сушков В. В., Горюнов В. Н., Ревякин Е. Е. Повышение эффективности электротехнической системы буровой установки с системой накопления электроэнергии // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 50–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-50-57. EDN: MNEKEO.

Статья поступила в редакцию 03.12.2024.

© В. В. Сушков, В. Н. Горюнов, Е. Е. Ревякин

ADVANCING EFFICIENCY OF A DRILLING RIG ELECTRICAL SYSTEM WITH A BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM

The article considers an inner current control loop design for a grid inverter of the battery energy storage system. For this purpose, a well-known methodology of subordinate control system design is used. According to this methodology the controller coefficients can be determined based on analytical findings. This approach will help prevent indefiniteness during the practical implementation of the automatic control system of grid inverter. The aim of the work is to advancing efficiency of the electrical system of a drilling rig with a battery energy storage system under peak load conditions. The problem of analytical determination of the coefficients of regulators in the automatic control system of a grid inverter has been solved. The structure of the automatic regulation system has been proposed. The efficiency of the automatic control system for the grid inverter is verified by the numerical indicators of the transient process quality obtained in this article.

Keywords: drilling rig, grid inverter, energy storage system, automatic control system, subordinate regulation system, peak load.

References

1. Gazizova O. V., Morshchakin A. E., Varganov D. E. [et al.]. Razrabotka meropriyatiy po obespecheniyu ustoychivosti promyshlennoy elektrostantsii s rezkoperemennoy nagruzkoy [Development of Measures to Ensure Sustainability of Industrial Power Plant with Variable Load]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. Electro Technical Systems and Complexes*. 2024. No. 1 (62). P. 26–32. DOI: 10.18503/2311-8318-2024-1(62)-26-32. EDN: MTLZLU. (In Russ.).
2. Razzhivin I. A., Suvorov A. A., Andreev M. V. [et al.]. Obzor matematicheskikh modeley sistem nakopleniya energii dlya modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem. Chast' I [A review of mathematical models of energy storage systems for electric power systems simulation. Part I]. *Izvestiya RAN. Energetika. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2023. No. 2. P. 58–80. DOI: 10.31857/S000233102302005X. EDN: JZIZSY. (In Russ.).
3. Kosarev B. A., Koshchuk G. A., Lazarev D. V. [et al.]. Spособы podderzhaniya znacheniy napryazheniya i chastoty v dopustimyykh predelakh v usloviyakh raspredelennoy generatsii pri rezkoperemennom kharaktere nagruзки potrebitelya [Methods for maintaining voltage and frequency values within acceptable limits in conditions of distributed generation with a sharply variable nature of the load of the consumer]. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy. Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2023. Vol. 19, no. 3. P. 64–73. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-64-73. EDN: NZWJYZ. (In Russ.).
4. Bachurin P. A., Gladkov D. S., Zyryanov V. M. [et al.]. Ispytaniya promyshlennogo obraztsa sistemy nakopleniya energii SNE-10-1200-400 pri sovmestnoy rabote s GPU v sostave eksperimental'noy energosistemy [Testing of industrial design energy storage system (ess-101200-400) and gas piston units in experimental power system]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. Electric power. Transmission and Distribution*. 2020. No. 2 (59). P. 18–25. EDN: WFLZYQ. (In Russ.).
5. Engels J., Claessens B., Deconinck G. Optimal combination of frequency control and peak shaving with battery storage systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, no. 4. P. 3270–3279. DOI: 10.1109/TSG.2019.2963098. (In Engl.).
6. Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Berezovskiy P. K. Effektivnoye ispol'zovaniye nakopiteley elektricheskoy energii dlya predotvrashcheniya otklyucheniya ob'yektov raspredelennoy generatsii pri kratkovremennykh otkloneniyakh chastoty [Effective application of electric energy storage for prevention of distributed generation units tripping due to short-time frequency deviations]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya. Relay Protection and Automation*. 2019. No. 4. P. 32–39. EDN: JSSGMJ. (In Russ.).
7. Chervonchenko S. S., Frolov V. Ya. Povysheniye energoeffektivnosti avtonomnoy sistemy elektroснабzheniya burovoy ustanovki pri provalakh napryazheniya [Increasing the energy efficiency of an autonomous power supply system of a drillingrig in case of voltage dips]. *Zapiski Gornogo instituta. Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 261. P. 470–478. EDN: MGAPVA. (In Russ.).
8. Fedotov A. I., Fedotov E. A., Abdullazyanov A. F. Ispol'zovaniye elektrokhimicheskikh nakopiteley energii v sistemakh avtonomnogo elektroснабzheniya dlya snizheniya raskhoda topliva energoustanovok [Use of electrochemical energy storage systems in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power installations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021. Vol. 23, no. 1.

P. 3–17. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. EDN: BITFGX. (In Russ.).

9. Ashtiani N. A., Ali Khajehoddin S., Karimi-Ghartemani M. Optimal design of nested current and voltage loops in grid-connected inverters // 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, 2020. P. 2397–2402. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124405. (In Engl.).

10. Zhao Z., Han Z., Liu X. [et al.]. Optimal Tuning of the Current Loop for Dual-Loop Controlled Grid-Forming Converters Based on Active Damping Optimization. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 35801–35813. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061098. (In Engl.).

11. Yan W., Shah S., Gevorgian V., Gao D. W. Sequence Impedance Modeling of Grid-Forming Inverters // 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Washington, 2021. P. 1–5. (In Engl.).

12. Plotnikov Yu. V., Polyakov V. N., Savosina A. A., Shcherbakov D. A. Sglazhivaniye pikovykh nagruzok v chastotno-reguliruyemom elektroprivode tramvaya s sistemoy khraneniya energii na baze superkondensatorov [Smoothing the peak loads in a frequency-controlled tram electric drive with a supercapacitor based energy storage device] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*. 2024. Vol. 67, no. 1. P. 21–35. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-21-35. EDN: MYQWKT. (In Russ.).

13. Shreyner R. T. Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov [Systems of subordinate regulation of electric drives]. Yekaterinburg, 1997. 279 p. (In Russ.).

14. Razzhivin I. A., Suvorov A. A., Andreev M. V. [et al.]. Obzor matematicheskikh modeley sistem nakopleniya energii dlya modelirovaniya elektroenergeticheskikh sistem. Chast' I [A review of mathematical models of energy storage systems for electric power systems simulation. Part I]. *Izvestiya RAN. Energetika. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2023. No. 3. P. 34–56. DOI: 10.31857/S000233102303007X. EDN: TBBYWM. (In Russ.).

SUSHKOV Valeriy Valentinovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Electrical Power Engineering and Electrical Engineering Department, Industrial University of Tyumen (IUT), Tyumen.

SPIN-code: 1060-8949

AuthorID (RSCI): 446636

AuthorID (SCOPUS): 55971218900

Correspondence address: sushkovvv@gray-nv.ru

GORYUNOV Vladimir Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

REVYAKIN Egor Evgenyevich, Assistant of the Electrical Power Engineering and Electrical Engineering Department, IUT, Tyumen.

SPIN-code: 3627-6031

AuthorID (RSCI): 1097835

Correspondence address: revyakin.egor.ev@gmail.com

For citations

Sushkov V. V., Goryunov V. N., Revyakin E. E. Advancing efficiency of a drilling rig electrical system with a battery energy storage system. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 50–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-50-57. EDN: MNEKEO.

Received December 3, 2024.

© V. V. Sushkov, V. N. Goryunov, E. E. Revyakin

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА РЕСУРСА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

В статье рассмотрен комплексный подход к оценке остаточного ресурса для трансформаторов со значительным сроком эксплуатации более 30 лет. На примере комплексного диагностического обследования двух трансформаторов продемонстрировано, что трансформаторы имеют различные варианты старения активной части и подход к оценке ресурса должен быть различным. Первый вариант — это равномерное общее «старение» активной части, факт старения на надежности сказывается через 50–60 лет. Второй вариант — это возникновение локального дефектного узла с вибрацией (ВИБРО) и электроразрядными явлениями (ЭРА), дефект появляется спонтанно через 15–25 лет.

Появление критических дефектов может быть зафиксировано в режиме on-line с применением инновационных методик. Процессами, определяющими старение узлов активной части, являются явления «ВИБРО»–«ЭРА»–«ТЕРМО»–«ХАРГ». По анализу параметров и динамике явлений можно оценить техническое состояние и ресурс. Данный подход подтверждается анализом технического состояния по типичным вариантам возникновения дефектов в трансформаторах.

Ключевые слова: электроразрядные явления, виброявления, виброудары, степень распрессовки, мера деструкции, тепловизионный контроль, ХАРГ.

Актуальность. Поддержание эксплуатационной надежности и процедуры ремонта определено в нормативной документации [1–4]. Практика показывает [5–8], что из всего парка ~30–50 % силовых трансформаторов эксплуатируются уже более 30 лет. «Сценарии старения» трансформаторов имеют два основных варианта:

1) равномерное общее «старение» активной части, факт старения сказывается на надежности через 50–60 лет. Обычно это блочные трансформаторы и трансформаторы узловых подстанций,

которые работают в стационарном режиме и останавливаются один раз в год для ремонта и обслуживания;

2) возникновение локального дефектного узла с виброявлениями (ВИБРО) и электроразрядными явлениями (ЭРА), дефект появляется спонтанно через 15–25 лет. Причинами развития локальных дефектов обычно являются близкие короткие замыкания (КЗ), перенапряжения, часто переменная нагрузка, реже — дефекты конструкции или изготовления.

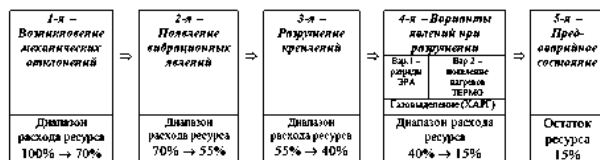
По первому варианту ресурс трансформаторов определяется по индексу технического состояния (ИТС), порядок расчета ИТС определен Приказом министра энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676.

По второму варианту при локальном дефекте деструкция обычно бывает быстрой с возникновением вибрационных (ВИБРО) и электроразрядных (ЭРА) процессов. При этом выход из строя трансформатора будет спонтанным и его невозможно предсказать по ИТС.

Цель работы — показать, что появление критических дефектов может быть зафиксировано при комплексном диагностическом обследовании (КДО) в режиме on-line с применением инновационных методик [9–11], которые позволяют провести локацию зон с наличием дефектных узлов, определить критичность дефекта и дать время на подготовку к устранению во время ремонта. В работе продемонстрировано, что знание природы дефекта и степени его развития позволяет подобрать режим работы, при котором проявление дефекта будет минимальным [10], что позволит выиграть время для подготовки ремонта. Эффективность КДО показана в [12–15], возможности оценки технического состояния трансформаторов после ремонта будут представлены в данной статье. Сценарии развития дефектов и их модель обоснованы на базе данных по КДО более 1000 ед. и ремонтов более 100 ед. трансформаторов в течение 20 лет. Это подтверждено работами на Жигулевской, Саратовской, Нижнекамской, Вилюйской ГЭС, Загорской ГАЭС и ПС.

Оценка ресурса при возникновении локального дефекта. Основой оценки реального ресурса служит анализ доминирующих механизмов деградации (Приказ Ростехнадзора от 13 октября 2017 г. № 429) [16, 17] с учетом механического износа (под действием вибрации) и электрического, разрядного воздействия. При этом имеет место синергия, т.е. влияние ВИБРО на ЭРА. Развитие дефекта состоит из последовательности процессов «внешнее воздействие (близкое КЗ, перенапряжение и т.д.)», появление вибрации (ВИБРО) или частичных разрядов (ЧР), дальнейшее воздействие вибрации на активную часть и появление других разрядов (искрений) в местах истирания изоляции пластин пакета или изоляции элементов крепления сердечника (стяжные шпильки, полубандажи и т.д.). Развитие повреждения происходит по следующей упрощенной схеме: вибрация — ослабление креплений — истирание изоляции — появление разрядов — повреждение.

Деградация узлов активной части по стадиям при спонтанном возникновении локального дефекта (вариант № 2):



Для определения технического состояния трансформатора требуется определение текущего технического состояния узлов трансформатора, информативным является КДО в режиме on-line. Процессами, определяющими старение узлов активной части, являются явления «ВИБРО» — «ЭРА» — «ТЕРМО» — «ХАРГ» (хроматографический анализ газов, растворенных в масле). По анализу параметров и динамике явлений будет оцениваться



Рис. 1. Внешний вид автотрансформатора АТДЦТН-63000/220

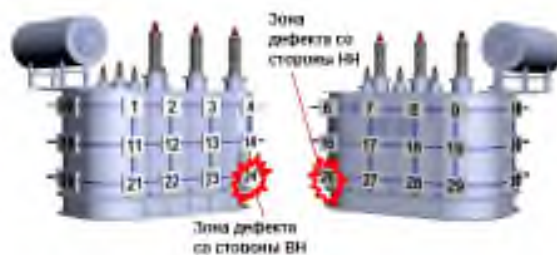


Рис. 2. Обозначение точек установки датчиков на баке трансформатора и зон дефектов

техническое состояние и ресурс [18]. Данный подход подтверждается анализом технического состояния по типичным вариантам возникновения дефектов в трансформаторах. В данной статье приведены два примера:

Объект I — трансформатор с малозначительным локальным дефектом перед ремонтом и их анализ при режиме короткого замыкания.

Объект II — ответственный мощный блочный трансформатор с механическими повреждениями магнитной системы шунтов.

Объект I. Техническое состояние автотрансформатора по результатам КДО. На рис. 1 дан внешний вид обследуемого автотрансформатора, тип АТДЦТН-63000/220.

Изготовлен в 1988 г. на Тольяттинском трансформаторном заводе. Уровни напряжений не превышают предельно допустимых. Нагрузка 50–75 % от номинальной. На данном трансформаторе определен дефектный узел (домкрат), который был устранен при ремонте.

Результаты КДО

1. Электроразрядная активность.

Методика измерения ЧР и локации их зон определена в [1, с. 73; 3, с. 40; 4, с. 19–32; 19], фиксируют амплитуды импульса — Q , мВ; число импульсов — n , имп/период; мощность разрядов — P , о.е.

Наибольшая мощность разрядов в нижней части трансформатора на фазе (ф.) «С» со стороны высокого напряжения (ВН) (т. 24) и на стороне низкого напряжения (НН) (т. 26), рис. 2. Имеют место разряды и в форме искрений, ЧР тах в точках 24 и 26. Таким образом, в этой зоне существует развитый дефект с разрядами в изоляции (ЧР) и искрения между металлическими частями (пакеты, контакты с ярмовыми балками). Импульсы от ЧР с большой амплитудой, до 500 мВ, число импульсов 1,5–2 имп/на период. Таким образом, ЧР зажигается в каждые полпериода 50 Гц, следовательно, разряды имеют



Рис. 3. Анализ взаимного влияния ЭРА и ВИБРО явлений в дефекте по точкам измерения для определения их совпадения в обобщенной зоне

место между плоскостями (без острых выступов). При искрениях амплитуды малы (до 50 мВ), число импульсов — до 70 имп/период.

2. Вибрационное состояние и степень механического разрушения.

Методы вибродиагностики определены [3, с. 38; 20–22], фиксируются следующие параметры: интенсивность виброударов; степень распрессовки — $10/\delta$, дБ; мера деструкции (степень износа креплений) — Δ , дБ.

По спектральному анализу вычисляется усредненная мера деструктивного воздействия ($\delta = \Sigma P_{\text{д.г.}} - P_{100\text{Гц}}$ — локальная), которая определяет результат износа креплений ярма. Обнаружена *повышенная вибрация* на ф. «С» со стороны НН (Т. 26) и точки 24 на стороне ВН. Дефект обусловлен ослаблением креплений, возникающих от вибрации;

3. Анализ трансформаторного масла (ХАРГ) [11].

Зафиксировано *превышение граничных значений ацетилена*, соотношение газов указывает на дефект разрядного характера средней мощности. Дефект обусловлен явлениями в нижней части ф. «С» (Т. 24, 26) от вибрации и пробоями в масле между твердыми материалами. Соотношение CO_2/CO указывает, что повреждением не затронута твердая изоляция.

4. Особенности дефектной зоны (нижнее ярмо, балки, домкрат):

а) значительная вибрация приводит к ослаблению креплений из-за ослабления прессовки ярмовых балок. Вибрация сопровождается значительными искровыми явлениями, а также ЧР. Причиной значимых ЧР являются истирания изоляции прокладок между ярмом и балками или уменьшение расстояния между домкратом и ярмом;

б) еще одним слабым местом может быть зона нижнего ярма (максимальная мощность ЭРА и ВИБРО дефектов, а также результатов ХАРГ) из-за недостаточного расстояния от транспортировочных домкратов до магнитопровода. При этом возможен контакт или пробой на пакет или ярмовую балку, что является весьма распространенным дефектом. Дефектный узел представлен на рис. 3, вероятное место дефекта представлено на рис. 4.

Вывод по результатам КДО для Объекта I. В дефектном узле (зоны в Т. 24 и Т. 26) имеет место совпадение максимальных ЭРА и максимальных ВИБРО дефектов. Данные явления сопровождаются газовыделением. Установлен узел с дефектом —



Рис. 4. Вероятное место дефекта (Т. 24, 25, 26)



Рис. 5. Внешний вид трансформатора со стороны ВН

домкрат магнитопровода. После ремонта и восстановления изоляции дефекты отсутствуют, ресурс восстановлен (по оценке КДО до ~90 %).

Объект II. Техническое состояние магнитных шунтов мощного блочного трансформатора по данным КДО. Внешний вид трансформатора дан на рис. 5, его характеристики приведены ниже.

Трансформатор типа ТНЦ-1000000/500 (зав. № 131331) изготовлен в 1987 г. на Запорожском трансформаторном заводе.

Уровни напряжений на сторонах трансформатора не превышают предельно допустимых. Нагрузка на блочном трансформаторе составляет, как прави-



Рис. 6. Результат измерений значений деструкции (Δ, дБ, указаны на кривых) по баку на НН



Рис. 7. Результат измерений значений деструкции (Δ, дБ, указаны на кривых) по баку на ВН

ло, 80 % от номинальной. Документально зафиксированных перегрузок, перегревов и других аварийных режимов работы трансформатора с момента ввода в работу не выявлено.

На данном трансформаторе зафиксированы экстремально высокой интенсивности ТЕРМО, ВИБРО явления, газовыделения по ХАРГ, а также слабые электроразрядные процессы. Трансформатор обследовался в режимах XX (холостой ход) и номинальной мощности.

Результаты КДО

1. Анализ явлений ЭРА.

По всем точкам контроля и режимов работ трансформатора (XX и $P_{ном}$) значимые ЭРА отсутствуют.

2. Анализ ВИБРО диагностирования.

Использовались режимы XX и 80 % от номинальной мощности — $P_{ном}$. На данном трансформаторе виброударные воздействия, соответствующие распрессовке пакетов, отсутствуют.

$$\delta = \frac{P_{ч.г.}}{P_{100 Гц}}, \quad (1)$$

где $P_{ч.г.}$ — мощность четных гармоник; $P_{100 Гц}$ — мощность гармоники 100 Гц.

Фиксируется значительная вибрация, определяемая параметром Δ, дБ.

$$\Delta = P_{и.г.} - P_{100 Гц'} \quad (2)$$

где $P_{и.г.}$ — мощность интергармоник (гармоник между основными спектральными линиями 100, 200, 300 Гц и т. д.). Основные гармоники программно убираются ± 3 Гц.

Имеют место следующие дефекты:

- критическое значение $\Delta = 21$ дБ, фиксировались в т. 4 при $P_{ном'}$;
- значительные явления: $20 > \Delta > 10$ дБ, в т. 23, т. 29 при $P_{ном}$;
- малозначительные явления: $10 > \Delta$, т. 11, 2, 12; т. 16, 17, 18, 28.

а) Анализ распределений значений деструкции Δ по стенкам бака. Измерение выполнялось по вертикальным образующим (например, по линии 1–11–21) рис. 2:

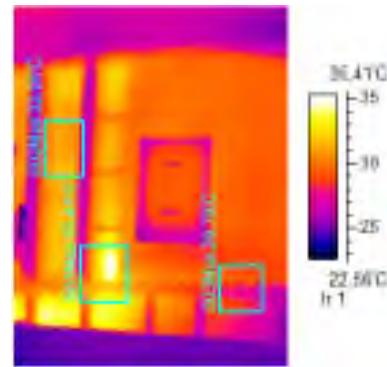


Рис. 8. Пример термограммы и значения температур боковой поверхности бака со стороны НН ф. «В»

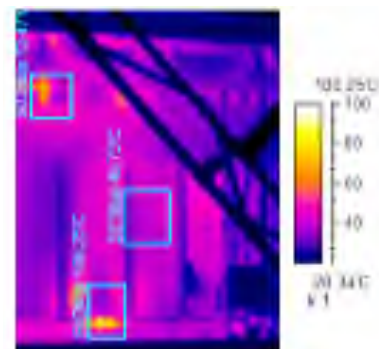


Рис. 9. Пример термограммы и значения температур боковой поверхности бака со стороны НН ф. «А»

- на номинальной мощности $P_{ном}$ (80 % от паспортной) имеют место потоки намагничивания и рассеяния, которые подпрессовывают пакеты и уменьшают вибрацию листов;
- в режиме XX — только поток намагничивания, который приводит к распушковке и значительной вибрации пакета;
- в режиме КЗ магнитные потоки отсутствуют, нет вибрации в пакетах (сердечнике и шунтах). Ви-

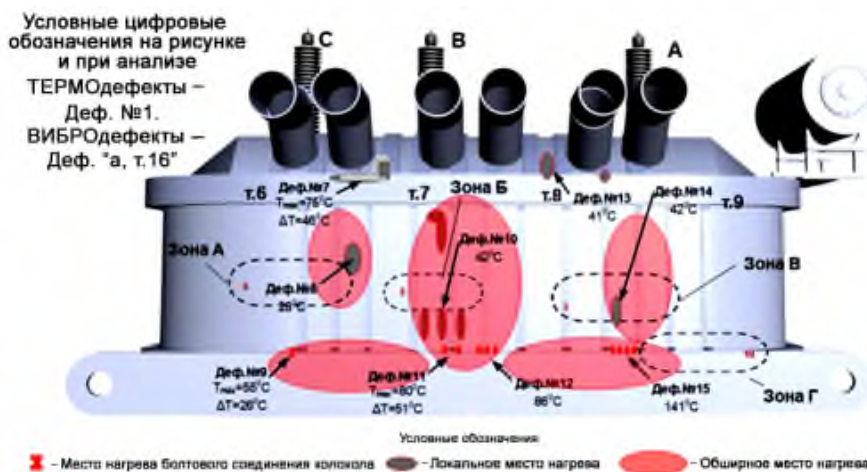


Рис. 10. Тепловые аномалии по корпусу трансформатора, обозначенные Деф. № 7–Деф. № 15, со стороны НН с указанием превышения температуры в зоне дефекта (т. 1 – т. 9)

бразия имеет место только в токонесущих узлах, отводах ВН и НН;

б) результаты анализа на стороне НН — эшюры распределения деструкции — Δ , дБ, по точкам контроля по высоте (верх, середина, низ) в режимах XX и мощности P_{max} показаны на рис. 6.

Из данных эшпор следует: для $P_{\text{ном}} - \bar{\Delta} = 1$; для $XX - \bar{\Delta} = 6$; на ф. «С» и «В» (т. 6 и 7) при $XX \Delta$ на порядок превосходит режим $P_{\text{ном}}$;

в) результаты анализа на стороне ВН — эюры распределения деструкции — Δ , дБ, в режимах КЗ, ХХ и мощности 80 % показаны на рис. 7.

Ниже приводятся усредненные значения. Из данных эпюр следует: для $P_{\text{ном}} - \bar{\Delta} = 4$; для $XX - \bar{\Delta} = 3$;

г) результаты ВИБРО диагностирования — наличие значительных дефектов:

— в режиме XX *деструкция значима*, особенно на стороне НН. При этом на XX деструкция меньше, чем при $P_{\text{ном}}$, так как при $P_{\text{ном}}$ имеет место подпрессовка пакетов шунтов от потока рассеяния;

— при XX шунты свободны, поэтому перемещения листов стали в шунтах не ограничены (кроме креплений, на них нет подпрессовывающих воздействий).

3. Анализ тепловизионного обследования [23].

Результаты термометрии в режиме $P_{\text{ном}}$ приведены на рис. 8 и рис. 9. Из рис. 8, 9 видно, что термодфекты (аномалии) размещены нерегулярно и не совпадают со стандартными фиксированными точками установки датчиков. По этой причине тепловые дефекты будут обозначены специально (№ 1 – № 15).

При измерениях в режиме ХХ (только поток намагничивания) отклонений температуры от равномерного распределения *не зафиксировано*. Значительные (критические) многочисленные тепловые аномалии имели место на $P_{ном1}$, когда есть значительные потоки рассеяния, поглощаемые магнитными шунтами. Значительные тепловые аномалии в верхней части (купол), на боковых поверхностях (Бок) и на болтах бака (Болт). Максимальная температура со стороны НН и на болтах главного разъема.

4. Анализ результатов ХАРГ масла [24]:

а) превышение граничных концентраций зафиксировано по этилену, водороду, метану, этану (влияние нагрева). Оценка скорости проводилась по анализу изменения концентрации за определенный период времени;

б) влагосодержание масла *соответствует* норме [1, с. 71–72, 139];

в) из анализа *типа дефекта* следует, что имеет место значительный термический дефект. Указанный факт подтверждает результаты тепловизионного контроля, где фиксируют перегревы более 40 °С;

г) скорость нарастания концентрации растворенных газов в масле по критическим газам превышала 90 % в месяц.

Вывод по ХАРГ: имеют место критические дефекты с перегревом и скоростью нарастания.

5. Комплексный анализ явлений в дефектах на блочном трансформаторе.

Анализ проводился по оценке взаимного влияния ВИБРО дефектов в зонах ТЕРМО дефектов. Оценивались явления по узлам: поверхность бака, купол и болтовые соединения на главном разъеме.

По локализации определены обобщенные зоны дефектов, в которых имеют место и вибрационные, и тепловые явления. Обобщенные зоны для стороны НН указаны на рис. 10, включая: **А, Б, В, Г**. Для стороны ВН, где интенсивность дефектов по порядку меньше, чем на стороне НН, фиксируются две зоны **Д, Е**. Газовыделения в отсутствии ЭРА определяются термическими явлениями от вибрационных процессов, обусловленных воздействиями от магнитных полей. На рис. 10 приведены точки с ВИБРО и ТЕРМО дефектами. При этом обозначены обобщенные зоны с совпадениями, обозначенные **А-Г**.

Выводы и заключение по результатам КДО для Объекта II

1. По видам диагностирования — общее техническое состояние характеризуется:

а) состояние по «ВИБРО», «ТЕРМО» — *значительные дефекты* (зона стороны НН — состояние, близкое к критическому);

б) по ХАРГ масла трансформатора — имеют место значительные дефекты термического характера со скоростью нарастания, близкой к 100 % в месяц.

2. Итоговые выводы по техническому состоянию:

а) техническое состояние на баке (зоны А-Г) соответствует значительным отклонениям, дефекты значительные (критические, деф. № 10, № 14), есть совпадения ТЕРМО явлений с ВИБРО дефектами;

б) «критические» перегревы на куполе, перегрев $\Delta T > 70^\circ \text{C}$ (Деф. № 7 и Деф. № 13). Виброконтроль на куполе не проводился;

в) «критический» перегрев болтов: Деф. № 12, $\Delta T = 86^\circ \text{C}$, и Деф. № 15, $\Delta T = 141^\circ \text{C}$;

г) обнаруженные отклонения (дефекты) имеют место в шунтах. По этой причине активная часть — ремонтпригодна (возможно восстановление ресурса). Оценка ИТС ~85 % для активной части, без учета шунтов.

Знание реального технического состояния трансформатора позволяет эксплуатирующей организации:

1. Принять решение о целесообразности проведения ремонтных работ или переносе ремонта.

2. В случае принятия решения о ремонте дает понимание объема и глубины ремонта, возможности подготовиться к ремонту, так как вскрытие колокола на блочном трансформаторе — дорогой и сложный процесс, требующий знающего ремонтного персонала и специального оборудования.

3. В случае наличия критических дефектов и необходимости доработать до ремонта можно подобрать режим работы трансформатора на пониженной мощности, особенно реактивной. Режим подбирается по программе во время изменения реактивной и активной мощности с одновременным измерением в критических точках основных параметров. Методика описана в [4].

Список источников

1. СТО 34.01-23.1-001—2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. URL: <https://stds.ru/document/СТО%2034.01-23.1-001-2017.pdf> (дата обращения: 14.08.2024).

2. Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей: приказ Министра энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».

3. СТО РусГидро 02.03.77—2015. Гидроэлектростанции. Правила продления срока службы основного оборудования в процессе эксплуатации. Нормы и требования. URL: https://standartgost.ru/g/СТО_РусГидро_02.03.77-2011 (дата обращения: 14.08.2024).

4. МУ 1.2.1.16.0220—2014. Оценка состояния и продление срока службы силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и их вводов. URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/mu-1-2-1-16-0220-2014-otsenka-sostoyaniya-i-prodlenie-sroka-sluzhby.html> (дата обращения: 14.08.2024).

5. Аксенов Ю. П., Голубев А. В., Завидей В. И., [и др.]. Результаты длительной периодической диагностики силовых трансформаторов // Электро. 2006. № 1. С. 28—35. EDN: KVNYPH.

6. Жуков А., Корнев М., Цветаев С. Повреждения силового трансформатора. Способы предотвращения // Новости электротехники. 2015. № 1. С. 36—28.

7. Львова М. М., Львов М. Ю., Комаров В. Б., [и др.]. О снижении риска повреждения силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше, сопровождающихся внутренними КЗ // Электрические станции. 2014. № 9. С. 41—48. EDN: SVVBOT.

8. Петрова В. В. Результаты длительной периодической диагностики силовых трансформаторов // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education. Collection of scientific articles XLVII International Correspondence Scientific and Practical Conference. Boston, USA. 2018. С. 34—37.

9. Ердяков М. А., Михайлов П. М. Методы диагностики силовых трансформаторов // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных. 29 ноября 2017 г. Лесниково: Изд-во КГСА им. Т. С. Мальцева, 2017. С. 48—51. EDN: YROLUL.

10. Молчанов М. В., Толкачев В. М., Толкачев Я. М., Кошелев Ю. И. Прогнозирование остаточного срока службы силовых масляных трансформаторов на основании данных мониторинга // Энергетика. Технологии, аппараты и машины жизнеобеспечения: сб. ст. III Научн.-техн. конф. Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. С. 184—198. EDN: DNFBKV.

11. Овчинников В. К., Хальясмаа А. И. Методы интерпретации результатов хроматографического анализа масла трансформаторного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13, № 1 (49). С. 177—190. EDN: XUGCJT.

12. Серебряков А. С., Семенов Д. А., Степанов С. Е. Анализ результатов измерений параметров изоляции силовых масляных трансформаторов // Вестник НГИЭИ. 2020. № 6 (109). С. 24—35. EDN: IOMTBE.

13. Власенко С. А. Диагностика силового оборудования электроэнергетических систем. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2019. 98 с. EDN: JGMSWT.

14. Гомазков Д. С., Кириосов М. С., Зенина Е. Г. Анализ критериев оценки остаточного ресурса обмоток силовых трансформаторов // Наукоемкие инновационные технологии и экологическая безопасность в энергетике: материалы междунар. науч.-практ. конф. 15—17 мая 2018 г. Волжский: Изд-во НИУ «МЭИ» (филиал), 2019. С. 59—64.

15. Бабицкий А. Применение метода оценки состояния и управления парком силовых трансформаторов // Вести в электроэнергетике. 2018. № 5 (97). С. 66—71. EDN: REMIIN.

16. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик электротехнического оборудования»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 октября 2017 г. № 429. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-Плюс».

17. Виноградова Л. В., Игнатьев Е. Б., Попов Г. В. [и др.]. К вопросу продления ресурса силовых трансформаторов электрических станций на примере КТРЭС // Повышение эффективности работы ТЭС. Труды ИГЭУ. Т. 3. Иваново, 1999. С. 147—157. EDN: RCKRBF.

18. Хренников А. Ю., Вахнина В. В., Кувшинов А. А., Александров Н. М. Силовые трансформаторы в электрических сетях: испытания, нормативные документы. Часть 1 // Библиотека электротехника. 2021. № 6 (270). С. 1—99. EDN: HBBUCX.

19. Николаева С. И., Корчагин Д. А. Анализ систем измерения частичных разрядов в изоляции трансформатора // Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию окончания Сталинградской битвы 31 января—02 февраля 2018 г. В 2 т. Волгоград: Изд-во ВГАУ, 2018. Т. 2. С. 464—469. EDN: XVTMJV.

20. Aksenov Y. P., Yaroshenko I. V., Andreev A. V., Noé G. Online transformer diagnostic methods synergy based on discharge and vibration events measurements and location // Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED). 2011. P. 437—443. DOI: 10.1109/DEMPED.2011.6063660.

21. Монастырский А. Силовые трансформаторы. Современные принципы построения систем непрерывного контроля // Новости электротехники. 2014. № 6. С. 42—43.

22. Губарев В. А. Современные методы вибрационного контроля высоковольтных трансформаторов // Инновационный путь развития как ответ на вызовы нового времени: сб.

ст. Междунар. науч.-практ. конф. (10 апреля 2021 г., г. Таганрог). Уфа: ООО «Аэтерна», 2021. С. 23–26. EDN: RCJFUE.

23. Михайлов Д. Н. Процесс проведения тепловизионного контроля силовых трансформаторов 35–110 Кв и анализ полученных результатов // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. Смоленск: Универсум, 2019. Т. 1. С. 47–51. ISBN 978-5-91412-413-4. EDN: DYWTSL.

24. СТО 34.01-23-003–2019. Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле. URL: https://sibenedia.ru/assets/images/STO_34.01-23-003-2019.pdf (дата обращения: 01.08.2024).

ЯРОШЕНКО Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и автоматизации автомобильной отрасли Шахтинского автомобильного института (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова), г. Шахты.

ORCID: 0009-0003-3287-5012

Адрес для переписки: igoryaroshenko@mail.ru

НОСЕНКО Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры механизации и автоматизации автомобильной отрасли Шахтинского автомобильного института (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Шахты.

SPIN-код: 1829-0233

AuthorID (РИНЦ): 621098

ORCID: 0000-0003-3003-8440

Адрес для переписки: vnosenko@mail.ru

АЛТУНИНА Мария Сергеевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры механизации и автоматизации автомобильной отрасли Шахтинского автомобильного института (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Шахты.

SPIN-код: 5438-7181

AuthorID (РИНЦ): 621093

ORCID: 0000-0001-5598-2564

Адрес для переписки: mariyaltunina@mail.ru

АКСЕНОВ Юрий Петрович, доктор технических наук, ведущий инженер по научно-технической информации ООО «Высоковольтные измерительные комплексы и системы», г. Балаково.

Адрес для переписки: diacsnew@list.ru

Для цитирования

Ярошенко И. В., Носенко В. В., Алтунина М. С., Аксенов Ю. П. Опыт определения технического состояния и оценка ресурса трансформаторов по результатам комплексного диагностического обследования // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 58–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-58-67. EDN: LYLMZH.

Статья поступила в редакцию 07.10.2024 г.

© И. В. Ярошенко, В. В. Носенко,
М. С. Алтунина, Ю. П. Аксенов

EXPERIENCE IN DETERMINING TECHNICAL CONDITION AND EVALUATING THE LIFETIME OF TRANSFORMERS BASED ON THE RESULTS OF A COMPREHENSIVE DIAGNOSTIC EXAMINATION

The article considers a comprehensive approach to assessing the residual lifetime for transformers with a significant service of more than 30 years. Using the example of a comprehensive diagnostic examination of two transformers, it is demonstrated that transformers have different options for aging the active part and the approach to resource assessment should be different. The first option is a uniform general «aging» of the active part, the fact of aging affects reliability after 50–60 years. The second option is the occurrence of a local defective node with vibration (VIBRO) and electric discharge phenomena (ERA), the defect appears spontaneously after 15–25 years.

The appearance of critical defects can be recorded on-line using innovative techniques. The processes that determine the aging of the nodes of the active part are the phenomena of «VIBRO»–«ERA»–«THERMO»–«HARG». By analyzing the parameters and dynamics of phenomena, it is possible to assess the technical condition and resource. This approach is confirmed by the analysis of the technical condition of typical variants of defects in transformers.

Keywords: electric discharge phenomena, vibration phenomena, vibration shocks, degree of compression, measure of destruction, thermal imaging control, HARG.

References

1. STO 34.01-23.1-001–2017. Ob'yem i normy ispytaniy elektrooborudovaniya [Scope and standards for tests of electrical equipment]. URL: <https://stds.ru/document/CTO%2034.01-23.1-001-2017.pdf> (accessed: 14.08.2024). (In Russ.).
2. Ob utverzhdenii metodiki otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i liniy elektroperedachi elektricheskikh stantsiy i elektricheskikh setey: prikaz Ministra energetiki RF ot 26 iyulya 2017 g. № 676 [On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main process equipment and transmission lines of electric power plants and power grids: order of the Minister of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017. No. 676]. Available at ConsultantPlus. (In Russ.).
3. STO RusGidro 02.03.77–2015. Gidroelektrostantsii. Pravila prodleniya sroka sluzhby osnovnogo oborudovaniya v protsesse

ekspluatatsii. Normy i trebovaniya. [Hydroelectric power plants. Rules for extending the service life of main equipment during operation. Norms and requirements]. URL: https://standartgost.ru/g/CTO_РусГидро_02.03.77-2011 (accessed: 14.08.2024). (In Russ.).

4. MU 1.2.1.16.0220–2014. Otsenka sostoyaniya i prodleniye sroka sluzhby silovykh transformatorov, avtotransformatorov, shchntiruyushchikh reaktorov i ikh vvodov [Assessment of the condition and prolongation of the service life of power transformers, autotransformers, shunt reactors and their inputs]. URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/mu-1-2-1-16-0220-2014-otsenka-sostoyaniya-i-prodlenie-sroka-sluzhby.html> (accessed: 14.08.2024). (In Russ.).

5. Aksekov Yu. P., Golubev A. V., Zaviday V. I. [et al.]. Rezul'taty dlitel'noy periodicheskoy diagnostiki silovykh transformatorov [Results of long-term periodic diagnostics of power transformers]. *Electro*. 2006. No. 1. P. 28–35. EDN: KVHYPH. (In Russ.).

6. Zhukov A., Kornev M., Tsvetayev S. Povrezhdeniya silovogo transformatora. Sposoby predotvrashcheniya [Damages of the power transformer. Methods of prevention] // *Novosti elektrotehniki. Electrical Engineering News*. 2015. No. 1. P. 36–28. (In Russ.).
7. L'vova M. M., L'vov M. Yu., Komarov V. B. [et al.]. O snizhenii riska povrezhdeniya silovykh transformatorov napryazheniyem 110 kV i vyshe, soprovozhdayushchikhsya vnutrennimi KZ [On reducing the risk of damage to power transformers with a voltage of 110 kV and above, accompanied by internal short circuits]. *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2014. No. 9. P. 41–48. EDN: SVVBOT. (In Russ.).
8. Petrova V. V. Rezul'taty dlitel'noy periodicheskoy diagnostiki silovykh transformatorov [Results of long-term periodic diagnostics of power transformers] // *International Scientific Review of the Problems and Prospects of Modern Science and Education*. Collection of scientific articles of XLVII International correspondence scientific and practical conference. Boston, USA. P. 34–37. (In Engl.).
9. Erdyakov M. A., Mikhaylov P. M. Metody diagnostiki silovykh transformatorov [Methods of diagnostics of power transformers] // *Razvitiye nauchnoy, tvorcheskoy i innovatsionnoy deyatel'nosti molodezhi*. Lesnikovo. 2017. P. 48–51. EDN: YROLUL. (In Russ.).
10. Molchanov M. V., Tolkachev V. M., Tolkachev Ya. M., Koshelev Yu. I. Prognozirovaniye ostatochnogo sroka sluzhby silovykh maslyanykh transformatorov na osnovanii dannykh monitoringa [Forecasting the remaining service life of power oil transformers based on monitoring data] // *Energetika. Tekhnologii, apparaty i mashiny zhizneobespecheniya*. Anapa, 2021. P. 184–198. EDN: DNFBKV. (In Russ.).
11. Ovchinnikov V. K., Khal'yasmaa A. I. Metody interpretatsii rezul'tatov khromatograficheskogo analiza masla transformatornogo oborudovaniya [Interpretation methods of dissolved gas chromatography of power transformer equipment]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2021. Vol. 13, no. 1 (49). P. 177–190. EDN: XUGCJT. (In Russ.).
12. Serebryakov A. S., Semenov D. A., Stepanov S. E. Analiz rezul'tatov izmereniy parametrov izolyatsii silovykh maslyanykh transformatorov [Analysis of measurement results of insulation parameters of power oil transformers]. *Vestnik NGIEI. Bulletin NGIEI*. 2020. No. 6 (109). P. 24–35. EDN: IOMTBE. (In Russ.).
13. Vlasenko S. A. Diagnostika silovogo oborudovaniya elektroenergeticheskikh sistem [Diagnostics of power equipment of electric power systems]. Khabarovsk, 2019. 98 p. EDN: JGMSWT. (In Russ.).
14. Gomazkov D. S., Kirnosov M. S., Zenina E. G. Analiz kriteriyev otsenki ostatochnogo resursa obmotok silovykh transformatorov [Analysis of criteria for evaluating the residual life of windings of power transformers] // *Naukovykh innovatsionnykh tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost' v energetike*. 15–17 May 2018. Volzhsky, 2019. P. 59–64. (In Russ.).
15. Babitskiy A. Primeneniye metoda otsenki sostoyaniya i upravleniya parkom silovykh transformatorov. [Application of the method of assessing the condition and management of the power transformers fleet]. *Vesti v elektroenergetike. News in the Electric Power Industry*. 2018. No. 5 (97). P. 66–71. EDN: REMIIN. (In Russ.).
16. Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii «Ustanovleniye i metody monitoringa resursnykh kharakteristik elektrotekhnicheskogo oborudovaniya»: prikaz Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 13 oktyabrya 2017 g. № 429 [On approval of the guidelines for safety in the use of atomic energy «Establishment and methods of monitoring the service life characteristics of electrical equipment»: order of the Federal environmental, industrial and nuclear supervision service No. 429 of 13 October 2017]. Available at ConsultantPlus. (In Russ.).
17. Vinogradova L. V., Ignat'yev E. B., Popov G. V. [et al.]. K voprosu prodleniya resursa silovykh transformatorov elektricheskikh stantsiy na primere KGRES [On the issue of extending the life of power transformers of electric power plants on the example of KGRES] // *Povysheniye effektivnosti raboty TES. Trudy IGEU. Improving the efficiency of thermal power plants. Works of IGEU*. Vol. 3. Ivanovo, 1999. P. 147–157. EDN: RCKRBF. (In Russ.).
18. Khrennikov A. Yu., Vakhnina V. V., Kuvshinov A. A., Aleksandrov N. M. Silovyye transformatory v elektricheskikh setyakh: ispytaniya, normativnyye dokumenty. Chast' 1 [Power transformers in electrical networks: tests, regulatory documents. Part 1]. *Bibliotekha elektrotehnika. The Library of Electrical Engineering*. 2021. No. 6 (270). P. 1–99. EDN: HBBUCX. (In Russ.).
19. Nikolayeva S. I., Korchagin D. A. Analiz sistem izmereniya chastichnykh razryadov v izolyatsii transformatora [Analysis of partial discharge measurement systems in transformer insulation] // *Mirovyye nauchno-tekhnologicheskkiye tendentsii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya APK i sel'skikh territoriy*. Volgograd, 2018. P. 464–469. EDN: XVMTJV. (In Russ.).
20. Aksenov Y. P., Yaroshenko I. V., Andreev A. V., Noé G. On-line transformer diagnostic methods synergy based on discharge and vibration events measurements and location // *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDMPED)*. 2011. P. 437–443. DOI: 10.1109/DEMPED.2011.6063660. (In Engl.).
21. Monastyrskiy A. Silovyye transformatory. Sovremennyye printsipy postroyeniya sistem nepreryvnogo kontrolya [Power transformers. Modern principles of building continuous monitoring systems]. *Novosti Elektrotehniki. Electrical Engineering News*. 2014. No. 6. P. 42–43. (In Russ.).
22. Gubarev V. A. Sovremennyye metody vibratsionnogo kontrolya vysokovol'tnykh transformatorov [Modern methods of vibration control of high voltage transformers] // *Innovatsionnyy put' razvitiya kak otvet na vyzovy novogo vremeni*. Ufa, 2021. P. 23–26. EDN: RCJFUE. (In Russ.).
23. Mikhaylov D. N. Protsess provedeniya teplovizionnogo kontrolya silovykh transformatorov 35–110 Kv i analiz poluchennykh rezul'tatov [The process of thermal imaging control of 35–110 Kv power transformers and analysis of the results obtained] // *Informatsionnye Tekhnologii, Energetika i Ekonomika*. In 3 Vols. Smolensk, 2019. Vol. 1. P. 47–51. ISBN 978-5-91412-413-4. EDN: DYWTSL. (In Russ.).
24. STO 34.01-23-003–2019. Metodicheskkiye ukazaniya po tekhnicheskomu diagnostirovaniyu razvivayushchikhsya defektov maslonapolnennogo vysokovol'tnogo elektrooborudovaniya po rezul'tatam analiza gazov, rastvorenykh v mineral'nom transformatornom masle [Methodological guidelines for technical diagnostics of developing defects of oil-filled high-voltage electrical equipment based on the results of gases dissolved in mineral transformer oil analysis]. URL: https://sibenedia.ru/assets/images/STO_34.01-23-003-2019.pdf (accessed: 01.08.2024). (In Russ.).

YAROSHENKO Igor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanization and Automation of the Road Industry Department, Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty.
ORCID: 0009-0003-3287-5012
Correspondence address: igoryaroshenko@mail.ru

NOSENKO Victoria Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanization and Automation of the Road Industry Department, Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty.

SPIN-code: 1829-0233
AuthorID (RSCI): 621098
ORCID: 0000-0003-3003-8440
Correspondence address: vvnosenko@mail.ru
ALTUNINA Maria Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanization and Automation of the Road Industry Department, Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty.
SPIN-code: 5438-7181
AuthorID (RSCI): 621093
ORCID: 0000-0001-5598-2564
Correspondence address: mariyaltunina@mail.ru
AKSENOV Yuri Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Leading Engineer in Scientific and Technical

Information, LLC «High voltage measuring complexes and systems», Balakovo.
Correspondence address: diacsnew@list.ru

For citations

Yaroshenko I. V., Nosenko V. V., Altunina M. S., Akse-
nov Yu. P. Experience in determining technical condition and
evaluating the lifetime of transformers based on the results of a
comprehensive diagnostic examination. *Omsk Scientific Bulletin*.
2025. No. 1 (193). P. 58–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-
58-67. EDN: LYLMZH.

Received October 07, 2024.

© **I. V. Yaroshenko, V. V. Nosenko,**
M. S. Altunina, Yu. P. Aksenov

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ТВЕРДООКСИДНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Решение вопросов эффективного использования твердооксидных электролизеров является перспективным для развития как энергетики, так и промышленности в целом, поэтому исследования в области повышения эффективности и надежности электролизеров проводятся учеными по всему миру. В данной статье рассматривается математическая модель материального баланса для твердооксидного электролизера, позволяющая оптимизировать параметры работы действующего и вновь проектируемого оборудования. В частности, особое внимание направлено на изучение влияния параметров работы электрохимических установок планарной конструкции при электролизе на состав продуктов реакций. На основе расчетных данных для твердооксидного электролизера планарной конструкции определена взаимосвязь между составами реагентов на входе и продуктами на выходе при помощи методов математического моделирования в сравнении с экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрохимические устройства, твердооксидный электролизер, химические реакции, материальный баланс, сила тока, напряжение.

Введение. Постоянно возрастающее потребление органического топлива приводит к образованию большого количества выбросов диоксида углерода. При этом образование парниковых газов, представляющих собою экологический аспект проблем дальнейшего развития энергетики, повышает актуальность использования альтернативных источников энергии, в том числе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). При этом обратимость ТОТЭ позволяет решать вопросы не только получения и использования водорода в качестве топлива, но и утилизировать диоксид углерода. В качестве примера Chung T. D. рассматривает использование электрохимических устройств, для утилизации CO_2 с получением синтетического топлива [1]. В настоящее время Институтом высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН разработан процесс, основанный на высокотемпературном совместном электролизе пара и CO_2 с использованием твердооксидных электролизеров (ТОЭ) для производства синтез-газа [2].

Следует отметить, что высокотемпературный электролиз является перспективной технологией. Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г., развитие водородной энергетики должно обеспечить рост объемов производства водородного топлива и его потребления. В то же время в стратегии социально-эконо-

мического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. отражена необходимость разработки современных технологий, снижающих образование парниковых газов, а также технологий улавливания и утилизации CO_2 . Одной из основных мер, способствующих решению этих задач, является разработка отечественных технологий производства чистого водорода методом высокотемпературного электролиза воды, а также электрохимической конверсии CO_2 с получением синтетического углеводородного топлива (синтез-газ, метан, метанол или диметиловый эфир) [3]. Наряду с синтетическим топливом синтез-газ является сырьем для производства широкого спектра химикатов, что открывает новые возможности для различных отраслей промышленности [4].

Совместный электролиз H_2O и CO_2 является новой областью исследований и работы по развитию энергоэффективности, повышению коэффициента конверсии, стабильности и долговечности. Работы электрохимических устройств являются актуальными [5].

Для решения вопросов оптимизации режимов работы электрохимических устройств необходимо отметить, что они имеют сложную конструкцию и изготавливаются из достаточно дорогостоящих материалов [6]. Поэтому для получения представлений

о технологических особенностях работы ТОЭ используют различные методы исследования, в том числе математическое описание электрохимических реакций, характеристик потоков входящих и выходящих газов и положений электрических контактов [7]. Методы численного моделирования могут позволить оптимизировать режимы работы устройств. При этом для получения адекватных результатов исследований и оптимизации модель должна содержать математическое описание физических законов, которые находятся в основе работы реального устройства. Хотя объекты в реальном мире всегда сложнее модели, при упрощении описания необходимо акцентировать внимание на характеристики устройства, которые позволяют управлять его работой [8].

В данной статье описываются результаты исследования, целью которого явилась разработка и оценка достоверности математической модели материального баланса твердооксидного электролизера планарной конструкции для производства синтез-газа из смеси паров воды и диоксида углерода. Возможность управлять процентным составом газа на выходе в зависимости от входных рабочих параметров позволяет определить необходимое соотношение $H_2 + H_2O$ к CO_2 на входе в катодное пространство, чтобы получить требуемое соотношение H_2 к $CO + CO_2$ с учетом склонности веществ к разложению и приложенному сопротивлению.

Исследование работы данного типа электрохимических устройств обусловлено тем, что данная конструкция позволяет перерабатывать CO_2 (дымовые газы) в синтез-газ, что позволит снизить количество выбросов, но именно оптимизация работы способствует получению сырья высокого качества для дальнейшего производства синтетического топлива (в том числе различных спиртов).

Задачи исследования:

1. Проанализировать зависимость между соотношениями реагентов на входе и соотношением веществ в продуктах, полученных при совместном электролизе H_2O к CO_2 в твердооксидном электролизере планарной конструкции, работающем на постоянном токе.

2. Сравнить данные, полученные при расчетах, с результатами, полученными при работе лабораторной установки с твердооксидным электролизером планарной конструкции.

В связи с данными задачами следует отметить, что математическая модель материального баланса составлялась с учетом допущений:

1. Модель составляется под конкретную конструкцию электролизера, и внесение конструктивных изменений в установку не рассматривается.

2. КПД устройства с данной конструкцией может быть охарактеризовано количеством вещества, подаваемого на электролиз.

3. Энергетическая характеристика элемента моделируется одним линейным уравнением, связывающим напряжение с постоянным током.

4. Параметры, характеризующие материалы, из которых изготовлен электролизер (твёрдый электролит, электроды и т.д.), учитываются в модели через значение общего сопротивления и считаются постоянными.

5. При работе устройства выполняется закон сохранения масс: «масса веществ, вступивших в химическую реакцию, равна массе образовавшихся веществ».

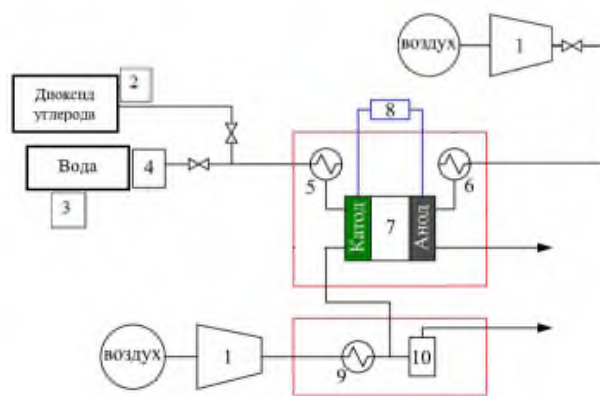


Рис. 1. Лабораторный стенд: 1 — воздушные компрессоры; 2 — регулятор расхода углекислого газа; 3 — регулятор расхода воды; 4 — парогенератор; 5 — теплообменник для подогрева топлива; 6 — теплообменник для подогрева воздуха; 7 — ТОЭ; 8 — регулируемый источник постоянного тока; 9 — теплообменник для подогрева воздуха; 10 — катализатор дожигания топлива

Физические особенности электрохимической установки. Схема лабораторной установки приведена на рис. 1. Она состоит из электролизера планарной конструкции системы подачи и отвода газов, парогенератора и дожигателя.

Конструкция электрохимической установки обеспечивала возможность проведения исследований работы электролизера при использовании газовой смеси, состоящей из водорода, углекислого газа и водяных паров. Данные газы подавались из баллонов, установленных попарно и расположенных вне испытательной комнаты.

Управление составом смеси реагентов осуществлялось с помощью регуляторов массового расхода для газов, входящих в ее состав. Для подачи воздуха в анодное пространство использовался компрессор.

На выходе из установки был предусмотрен реактор-дожигатель для сжигания образующегося синтез-газа, использующий дополнительный воздух, подаваемый с отдельного компрессора.

Для работы электролизера использовался регулируемый источник постоянного тока. Подаваемое на электролизер напряжение могло варьироваться в зависимости от условий проведения экспериментов. С помощью счетчиков электрической энергии, установленных в лабораторной установке, было определено удельное энергопотребление на единицу массы получаемого синтез-газа.

При работе установки использован электрохимический датчик кислорода, позволяющий на основе константы диссоциации воды оценить содержание водяных паров в отходящих газах. Определение влажности продуктов окисления топлива, что позволяло контролировать наличие восстановительной атмосферы в катодном пространстве ТОЭ. Используемый датчик представляет собой гальванический элемент с твердым электролитом из керамики YSZ, благодаря чему по величине генерируемой ЭДС он позволяет определять концентрацию исключительно кислорода.

Аналитический контроль выходящих газов в процессе испытаний ТОЭ осуществлялся с помощью хроматографа. Идентификацию вещества

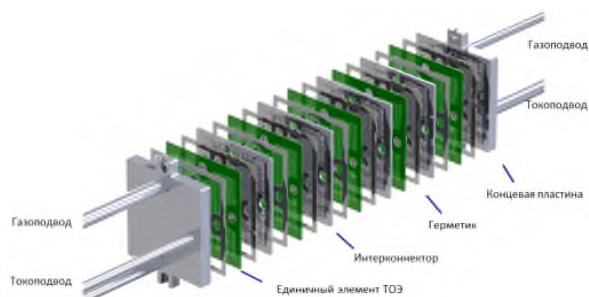


Рис. 2. Модель твердооксидного электролизера планарной конструкции

осуществляли по его времени удерживания. Количественный анализ проводили на основе предуготовленной зависимости площади пика вещества на хроматограмме от его объемной концентрации. По найденным значениям площадей пиков вычисляли среднее арифметическое и по градуировочной характеристике находили объемную концентрацию определяемого вещества.

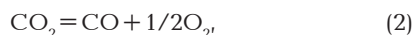
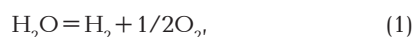
Электролизер планарной конструкции, установленный в данной установке, включал 30 единичных ячеек, каждая из которых состояла из двух электродов, разделенных слоем электролита. Со стороны катода, имеющего отрицательный заряд, подают газовую смесь, подлежащую электролизу. На границе раздела фаз происходят электрохимические реакции, в результате которых углекислый газ и пары воды переходят соответственно в монооксид углерода и водород. Отделившиеся атомы кислорода принимают электроны от катода и преобразуются в ионы кислорода, которые, в свою очередь, могут проходить через слой электролита в сторону положительно заряженного электрода, называемого анодом. Модель электролизера представлена на рис 2.

В электролизере невозможно провести полное разложение водяного пара и углекислого газа, поэтому из катодного канала выходит четырехкомпонентная смесь, содержащая H_2O , CO_2 , CO и H_2 . Соотношение водород- и углеродсодержащих компонентов на выходе в том числе определяется их соотношением на входе ТОЭ.

Теоретические основы проведения исследования. Материальный баланс определяет связь процентной концентрации реагентов и полученных продуктов при заданных расходах на входе или выходе из устройства при определенной токовой нагрузке. При этом реагенты проходят через устройство по каналам, которые образуются между парами пластин катод-интерконнектор и анод-интерконнектор.

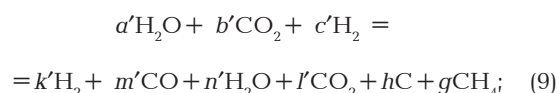
Технологический процесс получения синтез-газа можно описать потоками реагентов и продуктов реакций. Для этого составлен материальный баланс электрохимического устройства, который является выражением закона сохранения массы вещества [9–10].

В общем виде работу можно описать химическими реакциями:



Данный перечень можно условно разделить на реакции, которые описывают процесс электролиза реакции образования целевого продукта (1–2) и побочные реакции, которые связаны с предотвращением образования углерода на поверхности каналов, влекущего за собой увеличение местного сопротивления и потери скорости движения потока газа по каналам.

Для сложных процессов проводят суммирование уравнений отдельных стадий реакции, что всегда приводит к химическому уравнению полной реакции. Тогда в общем виде материальный баланс будет содержать уравнения суммарных реакций электролиза (8) и побочных превращений (9), протекающих в катодном канале, также от уравнений закона сохранения массы/стехиометрических коэффициентов (10), закона Фарадея (11) [9–10]:



$$\frac{v_a}{a} = \frac{v_i}{i}; \quad (10)$$

$$v = \frac{It}{zF}; \quad (11)$$

$$U = IR; \quad (12)$$

где I — сила постоянного тока, А; τ — время пропускания тока, с; z — валентное число ионов вещества; F — постоянная Фарадея, Кл/моль; v — количество выделившегося вещества, моль; $a, b, c, g, h, k, m, n, l, a', b', c', g', h', k', m', n', l'$ — стехиометрические коэффициенты; v_a, v_i — количество вещества для компонентов a, i , моль; U — напряжение ячейки электролизера, В; R — общее сопротивление материалов ячейки, Ом [10–11].

Для математического описания работы установок определены характеризующие работу ТОЭ параметры:

1. Соотношение исходных компонентов для получения синтез-газа заданного состава;

2. Расход реагентов, определяющий количество вещества, которое должно прореагировать в устройстве;

3. Количество электричества, затраченное на совместный электролиз H_2O и CO_2 [10–11].

Аналитическая модель материального баланса твердооксидного электролизера приведена в табл. 1.

В табл. 1 в квадратных скобках ($[x]$) указано процентное содержание элемента x , а обозначение M_x используется как обозначение молярных масс для x элементов.

Согласно составленной модели, материальный баланс состоит из двух потоков (целевая и побочная реакции), что обусловлено химическим процессом совместного электролиза CO_2, H_2O .

Реагент	Количество вещества	Продукт	Количество вещества
Целевая реакция			
Катод			
Вход		Выход	
H ₂ O	$(v_{\text{реа}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot a'}{c'} \right)$	H ₂	$\frac{\left((v_{\text{реа}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot a'}{c'} \right) \right) \cdot k}{a}$
CO ₂	$(v_{\text{реа}} \cdot [\text{CO}_2]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot b'}{c'} \right)$	CO	$\frac{\left((v_{\text{реа}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot a'}{c'} \right) \right) \cdot m}{a}$
		H ₂ O	$\frac{\left((v_{\text{реа}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot a'}{c'} \right) \right) \cdot n}{a}$
		CO ₂	$\frac{\left((v_{\text{реа}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot a'}{c'} \right) \right) \cdot l}{a}$
Анод			
Вход		Выход	
O ₂	$\frac{v'_{\text{воз}} \cdot \tau \cdot [\text{O}_2] \cdot M_{\text{O}_2}}{V_m}$	O ₂	$\frac{v'_{\text{воз}} \cdot \tau \cdot [\text{H}_2\text{O}] \cdot f \cdot M_{\text{O}_2}}{V_m \cdot a} + \frac{\left((v_{\text{реа}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]) - \left(\frac{v_{\text{пооб}} \cdot [\text{H}_2] \cdot a'}{c'} \right) \right) \cdot f}{a}$
N ₂	$\frac{v'_{\text{воз}} \cdot \tau \cdot [\text{N}_2] \cdot M_{\text{N}_2}}{V_m}$	N ₂	$\frac{v'_{\text{воз}} \cdot \tau \cdot [\text{N}_2] \cdot M_{\text{N}_2}}{V_m}$
Побочная реакция			
Вход		Выход	
H ₂ O	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot a'}{c'}$	H ₂	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot k'}{c'}$
CO ₂	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot b'}{c'}$	CO	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot m'}{c'}$
H ₂	$v_{\text{пооб}} [\text{H}_2]$	H ₂ O	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot n'}{c'}$
		CO ₂	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot l'}{c'}$
		CH ₄	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot g'}{c'}$
		C	$\frac{v_{\text{пооб}} [\text{H}_2] \cdot h'}{c'}$

Результаты расчетов. Рабочие характеристики электролизера зависят от состава реагентов, подаваемых в установку. В данном случае этим параметром управляли через установку определенных соотношений между количеством водяного пара, монооксида углерода и водорода (данный показатель был принят как коэффициент K_1). Для каталитического синтеза метанола необходим синтез-газ, в составе которого будет сохраняться определенное

соотношение между количеством водорода и углеводородсодержащих компонентов (данный показатель был принят как коэффициент K_2).

$$K_1 = \frac{v_{\text{H}_2\text{O}} + v_{\text{H}_2}}{v_{\text{CO}_2}}, \quad (13)$$

где v_{CO_2} — количество вещества CO₂, подаваемого в электролизер, моль; $v_{\text{H}_2\text{O}}$ — количество вещества

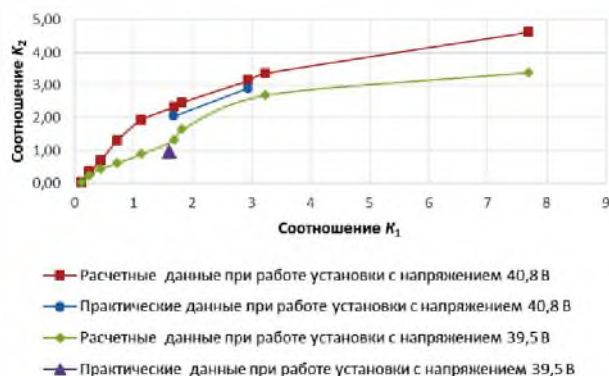
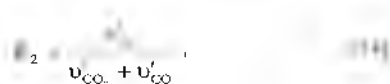


Рис. 3. Зависимость соотношений компонентов газа в реагентах и в продуктах при различных напряжениях



Рис. 4. Составы синтез-газа при соотношении компонентов в реагентах при $K = 1,7$

H_2O , подаваемого в электролизер, моль; v_{H_2} — количество вещества H_2 , подаваемого в электролизер, моль.



где v'_{CO} — количество вещества CO_2 на выходе из электролизера, моль; v'_{CO} — количество вещества CO на выходе из электролизера, моль; v'_{H_2} — количество вещества H_2 на выходе из электролизера, моль.

Получение синтез-газа на электролизере обеспечивается соотношением водородсодержащих компонентов к CO_2 на входе в электролизер. Математическую модель, представленную в табл. 1, использовали для определения зависимости коэффициента K_2 от K_1 при использовании лабораторного стенда.

Расчеты выполняли для следующих рабочих параметров:

1. На катод подавалась смесь H_2O , CO_2 , H_2 с суммарным расходом реагентов 11 л/мин. Коэффициент K_1 изменялся в диапазоне от 0,1 до 7,7;
2. Напряжение электролиза составляло 40,8 В и 39,5 В;
3. Температура газов при электролизе составляла 800 °С;
4. На выходе состав синтез-газа соответствовал требованию, что значение коэффициента K_2 должно быть в диапазоне от 2 до 2,4.

Результаты расчетов представлены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что необходимый состав синтез-газа ($K_2 = 2 - 2,4$) обеспечивается при $K_1 = 1,7$ (состав реагентов на входе в электролизер H_2O — 58,6 %, CO_2 — 34,5 %, H_2 — 6,9 %).

В результате расчета сравнивали эксперимент с аналогичными практическими данными. На вход в электролизер подавали смесь газов H_2O — 58,6 %, CO_2 — 34,5 %, H_2 — 6,9 %. Состав синтез-газа на выходе определяли с помощью отбора проб для хроматографии. Результаты экспериментов представлены на рис. 4 в сравнении с результатами математического моделирования согласно данным табл. 1.

Из диаграммы (рис. 4) следует, что расхождение между экспериментальным и расчетным составом продуктов реакций на выходе из электролизера составляет менее 6 %, наибольшие расхождения имеют показатели процентного содержания H_2O и H_2 . Это можно объяснить тем, что содержание H_2O в ходе эксперимента определялось расчетным способом ввиду невозможности его измерения на хроматографе.

Выводы и заключение. В рамках работы лабораторного стенда электрохимической установки для получения синтез-газа при совместном электролизе воды и углекислого газа были получены экспериментальные данные по получению синтез-газа с различным соотношением газов, входящих в его состав, в зависимости от изменения исходного состава подаваемых реагентов и рабочего напряжения установки.

Для описания работы твердооксидного электролизера планарной конструкции построена математическая модель материального баланса, позволяющая оценивать влияние соотношения реагентов и напряжения электролиза на состав получаемого синтез-газа на выходе из установки.

В основу данной модели были заложены технологические параметры работы реального лабораторного стенда; рассмотрены химические реакции, протекающие в единичном элементе электролизера; данные уравнения реакций электролиза и сопутствующих реакций были решены относительно состава подаваемой газовой смеси на входе в установку.

Проведена проверка адекватности модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных. Анализ результатов показал расхождение данных менее 6 %, что говорит об адекватности составленной модели и о возможности ее использования для планирования экспериментов работы электрохимической установки для получения продуктов электролиза заданного состава.

Полученные результаты показывают, что при изменении в реагентах соотношения количества вещества в диапазоне от 0,1 до 7,7 для коэффициента K_1 приводит к нелинейному изменению целевого соотношения для значений K_2 в диапазоне от 0,2 до 4,7. Следовательно, для дальнейшего производства различных химических веществ нужно подбирать свой состав реагентов для производства синтез-газа.

Список источников

1. Chung T. D., Chyou Y. P., Yu D. D. Study of the Flow Field in Channels and Internal Manifolds on the Interconnect of a Planar Solid Oxide Fuel Cell // International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. 2005. Vol. 37645. P. 273–280. DOI: 10.1115/FUELCCELL2005-74149.
2. Демин А. К. Разработка твердооксидных электрохимических устройств в ИВТЭ УрО РАН // Физическая химия и электрохимия расплавленных и твердых электролитов: материалы XVI Российской конф. (с междунар. участием); в 2-х т. 2013. Т. 2. С. 78–79. EDN: XFZHFT.

3. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г.». Доступ из информационно-правовой системы «Гарант».

4. Бреслер Л. Х., Хайруллина Д. М., Ошанина С. Д. Утилизация и улавливание CO₂ // Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / Отв. ред. Ю. В. Сивков. 2023. Т. 2. С. 36–40. EDN: NTVIIIH.

5. Sugihara S., Iwai H. Experimental investigation of temperature distribution of planar solid oxide fuel cell: effects of gas flow, power generation, and direct internal reforming // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, № 46. P. 25227–25239. DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.06.033.

6. Zhu Q. Developments on CO₂-utilization technologies // Clean Energy. 2019. Vol. 3, № 2. P. 85–100. DOI:10.1093/ce/zkz008.

7. Fussler C. Solution for a circular carbon economy // The CO2 Forum Briefing Paper; The CO₂ Forum. Lyon, France. 2015.

8. Qu Z., Aravind P. V., Dekker N., Janssen A. Modeling of flow field in planar solid oxide fuel cell // ECOS 2008 – Proceedings of the 21th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental impact of energy systems, June 2008, Poland. AGH University of Science & Technology/SUT, 2008. P. 1849–1856. ISBN 978-839-223-81-40.

9. Кравченко К. В. Особенности современных систем имитационного моделирования // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2014. Т. 1. С. 211–214. EDN: TEUGMN.

10. Перфильев М. В., Демин А. К., Кузин Б. Л., Липилин А. С. Высокотемпературный электролиз газов / отв. ред. С. В. Карпачев. Москва: Наука, 1988. 230 с. ISBN 5-02-001399-4.

11. Патров Б. В., Сладков И. Б. Физическая химия. Санкт-Петербург: Изд-во Политех. ун-та, 2003. 188 с.

ГОЛОДНОВА Анастасия Игоревна, младший научный сотрудник лаборатории электрохимических

устройств и топливных элементов Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН (ИВТЭ УрО РАН), г. Екатеринбург.

SPIN-код: 3510-7011

AuthorID (РИНЦ): 767921

ORCID: 0000-0003-2598-2269

Адрес для переписки: a.golodnova@ihte.ru

ЕРПАЛОВ Михаил Викторович, заведующий лабораторией электрохимических устройств и топливных элементов ИВТЭ УрО РАН, г. Екатеринбург.

SPIN-код: 6696-3245

AuthorID (РИНЦ): 788519

ORCID: 0000-0003-3113-598X

AuthorID (SCOPUS): 55747315200

ResearcherID: N-7453-2016

Адрес для переписки: m.erpalov@ihte.ru

ГОЛОДНОВ Антон Игоревич, доцент кафедры литейного производства и упрочняющих технологий Уральского федерального университета, г. Екатеринбург.

AuthorID (РИНЦ): 767918

ORCID: 0000-0003-2958-310X

AuthorID (SCOPUS): 57211929114

ResearcherID: R-3266-2016

Адрес для переписки: a.i.golodnov@urfu.ru

Для цитирования

Голоднова А. И., Ерпалов М. В., Голоднов А. И. Математическая модель материального баланса твердооксидного электролизера // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 68–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-68-75. EDN: DNZJSS.

Статья поступила в редакцию 27.08.2024.

© А. И. Голоднова, М. В. Ерпалов,

А. И. Голоднов

THE USE OF MATHEMATICAL MODEL TO EVALUATE THE MATERIAL BALANCE OF A SOLID OXIDE ELECTROLYSER

The effective use of solid oxide electrolyzers is a promising solution for the energy sector and industry in general. Therefore, scientists all over the world are conducting research on improving the electrolyzers' efficiency and reliability. In this paper, a mathematical model of the material balance for a solid oxide electrolyser is considered, which allows optimizing the operating parameters of existing equipment and newly designed equipment.

In particular, special attention is focused on studying the effect of the operating parameters of electrochemical plants of planar design during electrolysis on the composition of reaction products. The relation between the compositions of reagents at the inlet and products at the outlet is determined on the basis of calculated data for a planar solid oxide electrolyser using mathematical modeling in comparison with experimental data.

Keywords: mathematical modeling, electrochemical devices, solid oxide electrolyser, chemical reactions, material balance, current strength, voltage.

References

1. Chung T. D., Chyou Y. P., Yu D. D. Study of the Flow Field in Channels and Internal Manifolds on the Interconnect of a Planar Solid Oxide Fuel Cell // International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. 2005. Vol. 37645. P. 273–280. DOI: 10.1115/FUELCELL2005-74149. (In Engl.).
2. Demin A. K. Razrabotka tverdotsidnykh elektrokhimicheskikh ustroystv v IVTE UrO RAN [Development of solid oxide electrochemical devices at the Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Fizicheskaya khimiya i elektrokhiya rasplavlennykh i tverdykh elektrolitov. V 2 t. *Physical Chemistry and Electrochemistry of Molten and Solid Electrolytes*. In 2 vols. Yekaterinburg, 2013. Vol. 2. P. 78–79. EDN: XFZHFT. (In Russ.).
3. Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r «Ob Energeticheskoy strategii RF na period do 2035 g.» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1523-r dated 2020.06.09 «On approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035»]. Available at «Garant». (In Russ.).
4. Bresler L. Kh., Khayrullina D. M., Oshanina S. D. Utilizatsiya i ulavlivaniye CO₂ [CO₂ utilization and capture]. Arktika: sovremennyye podkhody k proizvodstvennoy i ekologicheskoy bezopasnosti v neftegazovom sektore. V 2 t. *The Arctic: Modern Approaches to Industrial and Environmental Safety in the Oil and Gas Sector*. In 2 vols. / Resp. ed. Yu. V. Sivkov. 2023. Vol. 2. P. 36–40. EDN: NTVIIH. (In Russ.).
5. Sugihara S., Iwai H. Experimental investigation of temperature distribution of planar solid oxide fuel cell: effects of gas flow, power generation, and direct internal reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, no. 46. P. 25227–25239. DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.06.033. (In Engl.).
6. Zhu Q. Developments on CO₂-utilization technologies. *Clean Energy*. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 85–100. DOI:10.1093/ce/zkz008. (In Engl.).
7. Fussler C. Solution for a circular carbon economy // The CO₂ Forum Briefing Paper; The CO₂ Forum. Lyon, France. 2015. (In Engl.).
8. Qu Z., Aravind P. V., Dekker N., Janssen A. Modeling of flow field in planar solid oxide fuel cell // ECOS 2008 – Proceedings of the 21th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental impact of energy systems, June 2008, Poland. AGH University of Science & Technology/SUT, 2008. P. 1849–1856. ISBN 978-839-223-81-40. (In Engl.).
9. Kravchenko K. V. Osobennosti sovremennykh sistem imitatsionnogo modelirovaniya [Features of modern simulation systems]. *Innovatsionnyye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika. Innovative technologies: theory, tools, practice*. 2014. Vol. 1. P. 211–214. (In Russ.).
10. Perfilov M. V., Demin A. K., Kuzin B. L., Lipilin A. S. Vysokotemperaturnyy elektroliz gazov [High-temperature electrolysis of gases]. Moscow, 1988. 230 p. ISBN 5-02-001399-4. (In Russ.).
11. Patrov B. V., Sladkov I. B. Fizicheskaya khimiya [Physical Chemistry]. Saint Petersburg, 2003. 188 p. (In Russ.).

GOLODNOVA Anastasia Igorevna, Junior Researcher, Laboratory of Electrochemical Devices and Fuel Cells, Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IHTE UB RAS), Yekaterinburg.

SPIN-code: 3510-7011
AuthorID (RSCI): 767921
ORCID: 0000-0003-2598-2269
Correspondence address: a.golodnova@ihite.ru
ERPALOV Mikhail Viktorovich, Head of the Laboratory of Electrochemical Devices and Fuel Cells, IHTE UB RAS, Yekaterinburg.
SPIN-code: 6696-3245
AuthorID (RSCI): 788519
ORCID: 0000-0003-3113-598X
AuthorID (SCOPUS): 55747315200
ResearcherID: N-7453-2016
Correspondence address: m.erpalov@ihite.ru
GOLODNOV Anton Igorevich, Associate Professor of the Foundry Production and Hardening Technologies Department, Ural Federal University, Yekaterinburg.

AuthorID (RSCI): 767918
ORCID: 0000-0003-2958-310X
AuthorID (SCOPUS): 57211929114
ResearcherID: R-3266-2016
Correspondence address: a.i.golodnov@urfu.ru

For citations

Golodnova A. I., Erpalov M. V., Golodnov A. I. The use of mathematical model to evaluate the material balance of a solid oxide electrolyser. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 68–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-68-75. EDN: DNZJSS.

Received August 27, 2024.

© A. I. Golodnova, M. V. Erpalov, A. I. Golodnov

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ПРОВАЛАМ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

Рассматривается принцип управления групповым частотно-регулируемым приводом со скалярной системой управления при кратковременных провалах напряжения в питающей сети. Представлена функциональная схема системы управления преобразователем частоты, позволяющая ограничить броски тока на входе автономного инвертора напряжения в момент резкого восстановления напряжения в питающей сети. Рассмотрены результаты исследования предлагаемого способа управления, полученные в процессе имитационного моделирования частотно-регулируемого привода в среде «MatLab».

Ключевые слова: система электроснабжения, защита минимального напряжения, преобразователь частоты, система управления, инвертор напряжения, общий выпрямитель, провал напряжения, частотное регулирование, звено постоянного напряжения.

В настоящее время в различных отраслях промышленности эксплуатируется частотно-регулируемый привод (ЧРП) и групповой частотно-регулируемый привод (ГЧРП). ГЧРП представляет собой сложный электротехнический комплекс, состоящий из системы электроснабжения, системы управления, ЧРП, исполнительных механизмов, приводимых в движение ЧРП. В агропромышленном секторе существует множество предприятий с непрерывным процессом производства, на которых эксплуатируется ГЧРП [1, 2]. Аварийная остановка процесса непрерывного производства может привести к увеличению времени повторного запуска оборудования, браку продукции, преждевременному выходу из строя механических узлов оборудования из-за возникновения динамических нагрузок в процессе неуправляемой остановки механизмов, возникновению аварий [3]. В большинстве случаев аварийная остановка оборудования с ГЧРП во время кратковременного снижения напряжения в питающей сети возникает по причине срабатывания защиты минимального напряжения (ЗМН), контролирующей напряжение в звене постоянного напряжения (ЗПН) ЧРП [4]. Срабатывание ЗМН происходит при возникновении переходных процессов и аварийных режимов в системе электроснабжения, переключении автоматического включения резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ) [5], коротких замыканий в линии электропередач и включения мощной нагрузки [6]. Интервал времени, в течение которого ЧРП и ГЧРП продолжает работать в условиях понижения питающего напряжения в сети ниже допустимой нормы, составляет 0,02 – 0,04 с.

При снижении напряжения в питающей сети штатными системами управления (СУ) автономными инверторами напряжения (АИН) для предотвращения возникновения аварийных бросков тока в транзисторных ключах АИН в момент резкого восстановления напряжения на их входах обеспечивается снятие импульсов управления транзисторами АИН. Существующие системы АПВ в преобразователях частоты (ПЧ) обеспечивают автоматический запуск ЧРП и ГЧРП в работу после срабатывания ЗМН по окончании заряда конденсатора С-фильтра ЗПН и полной остановки асинхронного двигателя (АД). Интервал времени подготовки ПЧ к повторному запуску в 10 – 15 раз превышает время кратковременного снижения напряжения в питающей сети при возникновении дестабилизирующих факторов, влияющих на сеть [7].

Срабатывание ЗМН, входящей в состав ПЧ, приводит к остановке технологического оборудования с ЧРП и ГЧРП, аварийным ситуациям на производстве, снижению ресурса технологического оборудования. В агропромышленном комплексе эксплуатируются технологические установки с ЧРП и ГЧРП, в которых, в соответствии с условиями технологического процесса, допускается кратковременное снижение скорости АД без полной остановки приводимых в движение механизмов на интервале времени преодоления кратковременного снижения напряжения в питающей сети. Для повышения устойчивости ЧРП к кратковременным провалам напряжения в лаборатории силовой электроники Комсомольского-на-Амуре университета разработан способ управления ЧРП и ГЧРП, направленный на увеличение времени ожидания на-

пряжения при возникновении аварийных режимов работы в питающей сети [8].

Работа ЧРП при снижении питающего напряжения характеризуется двумя случаями. В случае снижения напряжения в питающей сети до уровня, при котором не происходит срабатывания ЗМН,

$$U_{DC.Hom.} > U_{DC} > U_{DC.Min.},$$

где $U_{DC.Hom.}$ — номинальное значение напряжения в ЗПН, В; U_{DC} — фактическое значение напряжения в ЗПН, В; $U_{DC.Min.}$ — напряжение срабатывания уставки ЗМН.

Привод продолжает работать с уменьшенным электромагнитным моментом.

В случае если $U_{DC} < U_{DC.Min.}$ штатной СУ ЧРП осуществляется отключение привода за счёт снятия импульсов управления IGBT транзисторами АИН, с переводом АД на режим свободного выбега, повторный запуск ЧРП возможен после полной остановки АД, восстановления напряжения в трёхфазной сети и заряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения $U_{DC.Hom.}$. Время подготовки к повторному включению ЧРП $t_{п.в.}$ зависит от времени заряда конденсатора, определяемого параметрами токоограничительной цепи t_{RC} и быстродействием системы шунтирования токоограничительной цепи $t_{с.ш.}$, $t_{п.в.} = t_{RC} + t_{с.ш.}$.

После восстановления напряжения в питающей сети длительность $t_{п.в.}$ может превышать длительность кратковременного провала напряжения в трёхфазной сети в 10–15 раз.

Скорость разряда конденсатора С-фильтра ЗПН определяется следующими соотношениями:

мощность потребляемая АИН от ЗПН

$$P_{вх.АИН} = U_{DC} \cdot I_{вх.АИН}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $I_{вх.АИН}$ — входной ток автономного инвертора, А; мощность, потребляемая АД от АИН,

$$P_{Ав.} = \sqrt{3} \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos \varphi, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где U_{m1} — амплитуда линейного напряжения первой гармоники на выходе АИН, В; I_{m1} — амплитуда тока первой гармоники на выходе АИН, А.

В установившемся режиме работы ЧРП $P_{вх.АИН} = P_{Ав.}$ амплитуда первой гармоники линейного напряжения на выходе АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) определяется в соответствии с выражением

$$U_{m1} = \frac{m U_{DC}}{\sqrt{2}}, \text{ В}, \quad (3)$$

где m — коэффициент модуляции АИН.

Входной ток АИН, зависящий от активной составляющей тока АД, определяется соотношением

$$I_{вх.АИН} = \frac{\sqrt{3} m \cdot I_{m1} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{2}}, \text{ А}. \quad (4)$$

Интервал времени разряда конденсатора С-фильтра ЗПН до значения напряжения звена постоянного напряжения $U_{DC} = 0$ определяется из уравнения энергетического баланса как

$$T = \frac{U_{DC}^2 \cdot C_{\phi}}{2 P_{Ав.} K_p}, \text{ с}, \quad (5)$$

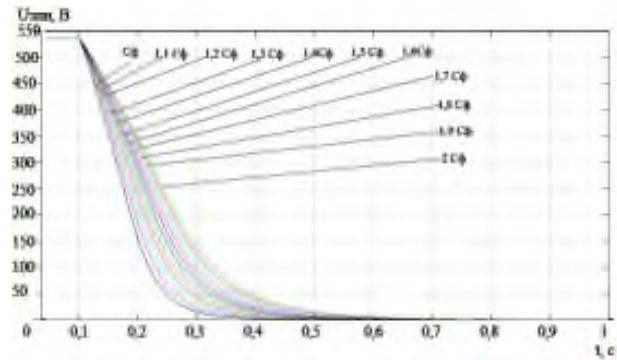


Рис. 1. Осциллограммы зависимости скорости изменения напряжения в ЗПН от ёмкости C_{ϕ}

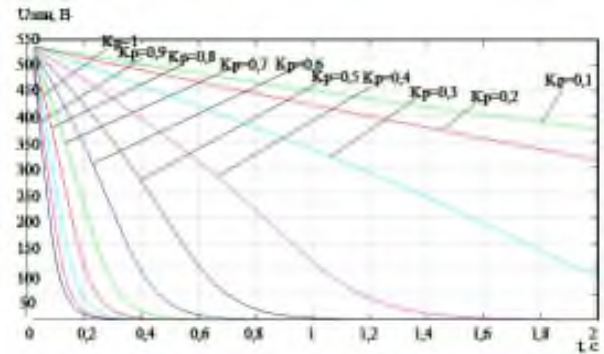


Рис. 2. Осциллограммы зависимости изменения напряжения на конденсаторе C_{ϕ} ЗПН от коэффициентов загрузки K_p АД

где C_{ϕ} — ёмкость конденсатора С-фильтра ЗПН, Ф; K_p — коэффициент загрузки АД.

Зависимость коэффициента загрузки АД от угловой скорости при вентиляторной нагрузке на валу двигателя определяется выражением

$$K_p = \frac{\omega^3}{(\omega - s \cdot \omega)^3}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где ω — номинальная скорость АД; s — скольжение.

Таким образом, скорость разряда конденсатора С-фильтра ЗПН зависит от ёмкости конденсатора С-фильтра [9] и степени загрузки АД при разряде конденсатора после снятия напряжения в питающей сети.

На рис. 1 представлены экспериментальные осциллограммы, характеризующие зависимость изменения напряжения в ЗПН от ёмкости C_{ϕ} при его разряде после снятия питающего напряжения с входа АИН, полученные в среде имитационного моделирования Matlab.

На рис. 2 представлены осциллограммы изменения напряжения на конденсаторе C_{ϕ} ЗПН при различных коэффициентах загрузки K_p АД после снятия напряжения с входа АИН. Исходя из полученных в ходе эксперимента данных установлено, что увеличить время ожидания восстановления напряжения в питающей сети возможно за счёт замедления скорости АД одновременно со снижением напряжения в ЗПН на интервале времени разряда конденсатора C_{ϕ} при сохранении управления АД ЧРП.

В лаборатории силовой электроники Комсомольского-на-Амуре государственного университета разработана СУ, реализующая способ управления

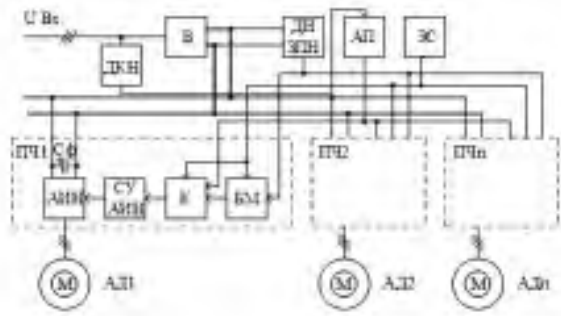


Рис. 3. Функциональная схема ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в питающей сети

выходной частотой АИН для замедления снижения напряжения в ЗПН по мере разряда конденсатора C_ϕ ЗПН и ограничения бросков входного тока АИН в момент резкого восстановления питающего напряжения на его входе с сохранением управления приводом на интервале преодоления аварийных режимов в питающей сети.

На рис. 3 представлена функциональная схема ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в питающей сети.

Функциональная схема ГЧРП рис. 3 содержит питающую сеть ($U_{вх}$), датчик контроля напряжения в трёхфазной сети (ДКН), общий трёхфазный выпрямитель (В), датчик контроля напряжения в ЗПН (ДН ЗПН), анализатор провалов в трёхфазной сети (АП), задатчик скорости асинхронных двигателей (ЗС), преобразователи частоты (ПЧ1, ПЧ2, ПЧn), асинхронные двигатели (АД1, АД2, АДn), подключенные к выходам ПЧ. В состав ПЧ входят: конденсатор С-фильтра C_ϕ ЗПН, система управления автономным инвертором (СУ АИН), коммутатор (К), блок масштабирования (БМ).

В предлагаемой схеме входы АИН, входящие в состав ПЧ, подключены к выходу общего выпрямителя [10]. В штатном режиме работы ГЧРП, скорость всех АД определяется заданием от общего ЗС. При возникновении в питающей сети отклонения напряжения от нормы, в АП формируется сигнал управления коммутатором К, который переводит СУ АИН в режим управления скоростью АД напряжением ЗПН. В процессе снижения напряжения в ЗПН осуществляется изменение задания скорости БМ с поочерёдным переводом АД из двигательного режима в режим генераторного торможения, что обеспечивает замедление разряда конденсатора C_ϕ и увеличение интервала ожидания восстановления напряжения в питающей сети. При восстановлении напряжения в питающей сети осуществляется разгон АД до номинальной скорости, без полной остановки, возникновения электродинамических ударов в статорных обмотках АД и превышения тока в транзисторных ключах АИН выше аварийного значения.

Возможность управления снижением скорости и разгоном АД изменяющимся напряжением в ЗПН при вентиляторной механической нагрузке основана на законе частотного регулирования $\frac{U}{f^2} = const$. Среднее значение напряжения в фазах на выходе трёхфазного АИН для выполнения закона частотного регулирования $\frac{U}{f^2} = const$ определяется выражениями:

$$U_{Вых.АИН} = \frac{K \sin(2\pi f_{Вых.АИН}) U_{DC.Ном.}}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

где K — коэффициент заполнения ШИМ, изменяющийся в диапазоне $K = 0...1$ при управлении $f_{Вых.АИН} = 0...50$ Гц [11, 12]:

$$K = \frac{f_{Дв.Ном.}}{f_{Вых.АИН}}. \quad (8)$$

В случае управления выходной частотой $f_{Вых.АИН}$ изменяющимся напряжением в ЗПН $U_{DC.Var.}$ в процессе разгона АД до номинальной скорости среднее значение напряжений трёхфазной системы на выходе трёхфазного АИН определяется выражениями:

$$U_{Вых.АИН} = \frac{K_{DC.Var.} \sin(2\pi f_{Вых.АИН,DC.Var.}) U_{DC.Var.}}{\sqrt{2}}, \quad (9)$$

где $K_{DC.Var.}$ — коэффициент заполнения при ШИМ IGBT транзисторов силового модуля АИН, зависящий от задания выходной частоты АИН $f_{Вых.АИН}$ на момент восстановления напряжения в ЗПН; $f_{Вых.АИН,DC.Var.}$ — частота на выходе АИН в режиме управления заданием выходной частотой АИН изменяющимся напряжением в ЗПН:

$$f_{Вых.АИН,DC.Var.} = f_{Вых.АИН} \frac{U_{DC.Var.}}{U_{DC.Ном.}}. \quad (10)$$

При управлении выходной частотой $f_{Вых.АИН,DC.Var.}$ изменяющимся в ЗПН напряжением $U_{DC.Var.}$ управляющим воздействием является напряжение $U_{DC.Var.}$. При изменении $U_{DC.Var.}$ в диапазоне $U_{DC.Var.} = 0...U_{DC.Ном.}$ для выражения (7) сохраняется закон частотного регулирования $\frac{U}{f^2} = const$.

В штатной СУ ЧРП при разряде конденсатора звена постоянного напряжения и снижении напряжения в ЗПН срабатывает ЗМН, предотвращающая броски аварийного тока в транзисторных ключах АИН при резком восстановлении напряжения на входе АИН, возникающие по двум причинам.

При резком восстановлении напряжения на входе АИН выходное напряжение АИН $U_{Вых.АИН}$ для каждой из фаз определяется выражением:

$$U_{Вых.АИН} = \frac{K_{DC.Var.} \cdot U_{DC.Ном.}}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

При разряде конденсатора С-фильтра ЗПН после снятия питающего напряжения, $U_{Вых.АИН'}$ приложенное к статорной обмотке АД, снижается до $U_{Вых.АИН,Пров.} < U_{Вых.АИН'}$ что приводит к броску тока в транзисторных ключах АИН и обмотках статора АД.

Вторая причина связана с нарушением синхронизации выходного тока $I_{Вых.АИН,m1}$ частоты первой гармоники и тока статора $I_{Ст.АД,m1}$ асинхронного двигателя. Нарушение синхронизации $I_{Вых.АИН,m1}$ и $I_{Ст.АД,m1}$ связано со снижением скорости АД в режиме выбега по отношению к заданию выходной частоты АИН $f_{Вых.АИН'}$. Для преодоления провала напряжения в ЗПН с отсутствием бросков тока на входе АИН $I_{Вх.АИН}$ и тока в статоре АД $I_{Ст.АД}$ необходимо выполнить на момент восстановления напряжения следующие условия:

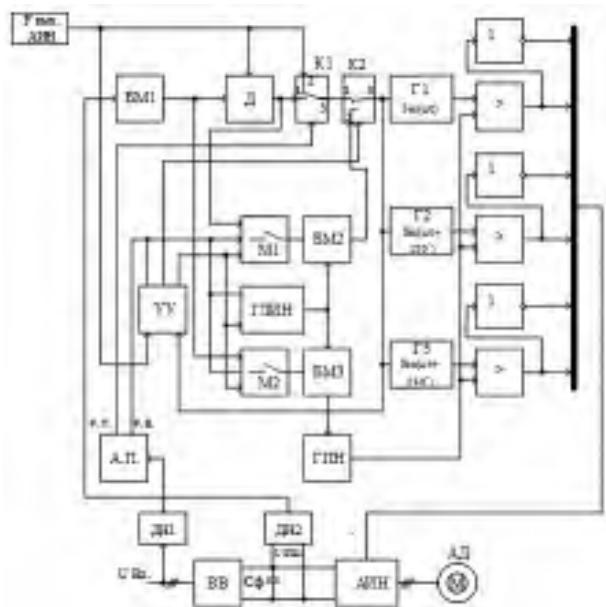


Рис. 4. Функциональная схема комбинированной системы управления АИН

— равенство частот

$$f_{\text{Вых.АИН}} = \omega_{\text{с.в.}} / 2\pi, \quad (12)$$

где $\omega_{\text{с.в.}}$ — радиальная скорость вектора поля статора;

— равенство выходного напряжения формируемого на выходе АИН системой управления $U_{\text{Вых.АИН}}$ и остаточного напряжения на обмотке АД $U_{\text{Ст.АД,Ост.}}$ в момент восстановления напряжения в звене постоянного напряжения

$$U_{\text{Вых.АИН}} = U_{\text{Ст.АД,Ост.}}. \quad (13)$$

Из анализа выражений (9), (10) следует, что сохранение равенства $f_{\text{Вых.АИН}} = \omega_{\text{с.в.}} / 2\pi$ и $U_{\text{Вых.АИН}} = U_{\text{Ст.АД,Ост.}}$ можно достичь в момент восстановления напряжения на входе АИН за счёт контроля значения $f_{\text{Вых.АИН}}$ системой управления и одновременной подстройкой коэффициента заполнения ШИМ $K_{\text{DC,Var.}}$ в соответствии с изменением напряжения на входе АИН. Включение АИН в работу без нарушения синхронизации тока статора АД и выходного тока АИН при отсутствии бросков тока статора АД и входного тока АИН с разгоном АД до номинальной скорости после восстановления напряжения на входе АИН возможно за счёт одновременного изменения $K_{\text{DC,Var.}}$ и $f_{\text{Вых.АИН}}$ в пропорции, изменяющейся в соответствии с кривой разгона АД.

На рис. 4 представлена функциональная схема разработанной комбинированной СУ, позволяющая устранить аварийные броски входного тока АИН при восстановлении напряжения на входе АИН с последующим разгоном АД до заданной скорости с любой пониженной скорости.

В нормальном режиме закон регулирования подчиняется отношению $U/f = \text{const}$. В момент регистрации глубокого провала напряжения в питающей сети на вход анализатора провала напряжения (АП) с датчика напряжения (ДН1) поступает информация о начале провала напряжения и на его выходе (РП) формируется сигнал управления коммутатором (К1), вход 1 которого в момент возникновения провала напряжения подключается к выходу 3.

С датчика напряжения (ДН2) информация об изменяющемся напряжении $U_{\text{ЗПН}}$ поступает через блок масштабирования (БМ1) на вход делителя (Д), на выходе которого формируется сигнал управления выходной частотой АИН в соответствии с законом изменения напряжения U_{DC} , поступающий на вход управления частотой опорных генераторов (Г1-Г3) через коммутатор (К2). С Г1-Г3 синусоидальное напряжение с изменяющейся частотой поступает на входы компараторов. В компараторах амплитуда напряжения, изменяющаяся по синусоидальному закону, сравнивается с напряжением, формируемым на выходе генератора пилообразного напряжения (ГПН). На выходе компараторов формируется ШИМ сигнал управления силовыми IGBT транзисторами АИН.

В момент восстановления напряжения в питающей сети на выходе А.П. формируется сигнал режима восстановления (Р.В.), поступающий на входы устройства управления (УУ), элементов памяти М1, М2 и вход управления генератором линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН).

Одновременно на выходе УУ формируется сигнал управления коммутатором К2, который подключает выход 3 к входу 2. Элемент памяти М1 сохраняет информацию о значении выходной частоты АИН, а М2 — о значении остаточного напряжения в ЗПН на момент восстановления напряжения в системе электроснабжения.

Одновременно с восстановлением напряжения в питающей сети запускается генератор линейно изменяющегося напряжения, скорость нарастания выходного напряжения определяется временем разгона АД с момента восстановления напряжения в ЗПН с пониженной скорости до номинальной. На входы блоков масштабирования БМ2 и БМ3 поступает информация с М1, М2. На выходе блока БМ2 формируется сигнал управления выходной частотой АИН, а на выходе БМ3 формируется сигнал управления амплитудой пилообразного напряжения ГПН для коррекции коэффициента модуляции и выполнения условия баланса напряжения. Дальнейшее управление выходной частотой и выходным напряжением АИН осуществляется в соответствии с законом плавного нарастания напряжения на выходе ГЛИН, которое определяется заданной интенсивностью разгона АД до номинальной скорости в соответствии с технологическим процессом. По достижению выходной частоты АИН заданного значения $f_{\text{Вых.АИН}}$ происходит переключение К2 в исходное состояние, ГПН переводится в исходный режим работы, ГЛИН, ячейки памяти М1, М2 готовятся к работе для регистрации следующего провала.

На рис. 5 представлена имитационная модель с комбинированной СУ ГЧРП. В качестве основы имитационной модели для исследования динамических процессов, возникающих в силовой части ЧРП при возникновении аварийных режимов работы системы электроснабжения, использован программный комплекс [13], разработанный в среде MatLab. Проанализируем результаты экспериментов, полученные в среде MatLab с штатной и комбинированной СУ ГЧРП. В имитационной модели ГЧРП использовались 3 ЧРП с АД АДКЗР мощностью $P_n = 160$ кВт с вентиляторной механической нагрузкой.

На рис. 6 представлены осциллограммы, полученные в процессе исследования ГЧРП с вентиляторной механической нагрузкой и штатной системой управления.

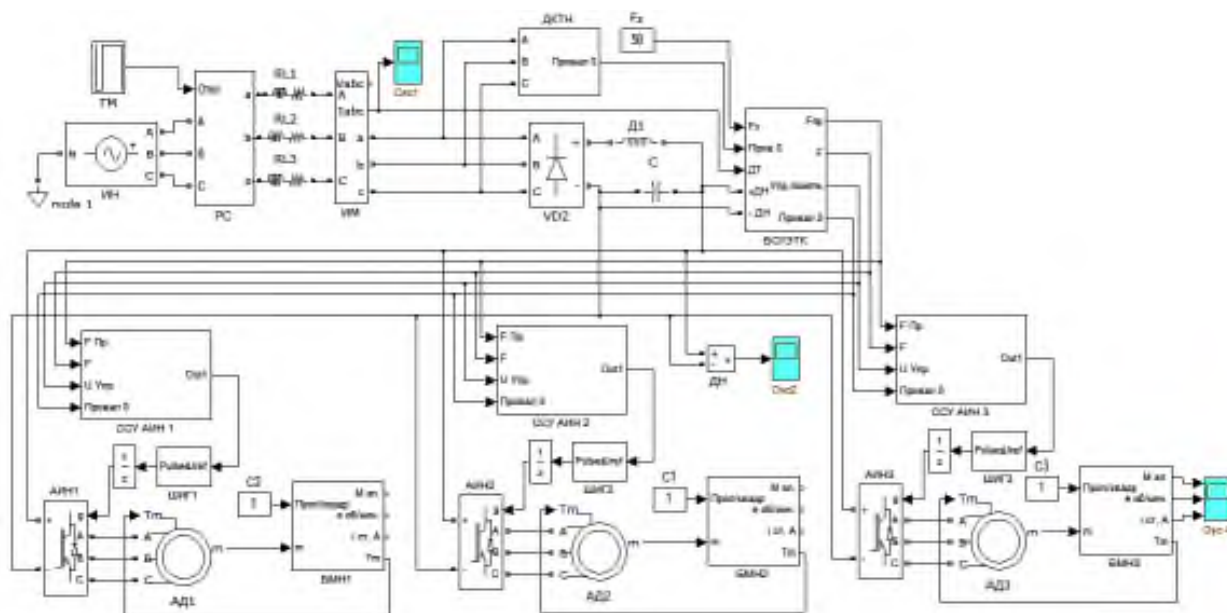
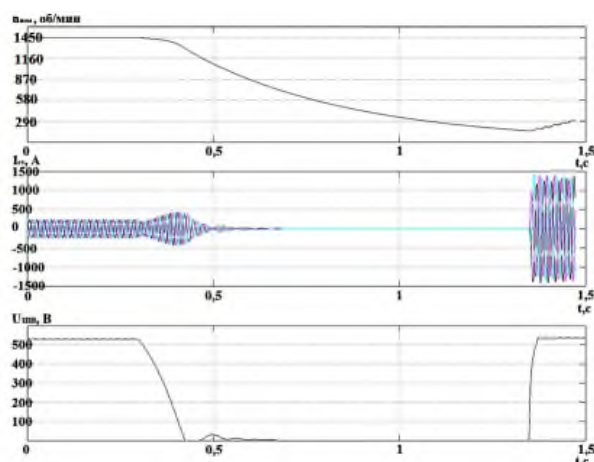
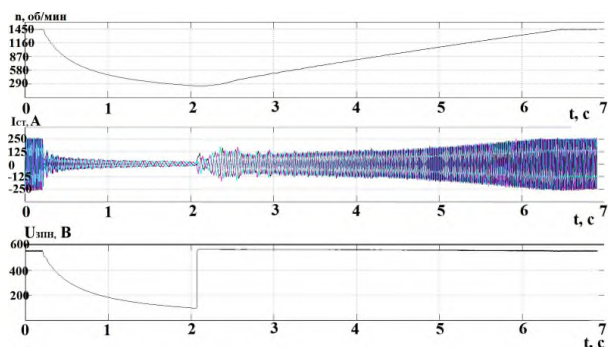


Рис. 5. Имитационная модель ГЧРП с повышенной устойчивостью к провалам напряжения

Рис. 6. Осциллограммы изменения: $I_{ст}$ — тока статора АД; $U_{зн}$ — напряжения на конденсаторе С-фильтра; n — скорости АД при квадратичной нагрузке АД по штатной схеме СУ ЭТК с ГЧРПРис. 7. Осциллограммы работы ГЧРП на интервале нормального, аварийного и послеаварийного режима питающей сети: $I_{ст}$ — тока статора АД; $U_{зн}$ — напряжения на конденсаторе С-фильтра; n — скорости АД

Условия эксперимента следующие: суммарная мощность ГЧРП $P_{ГЧРП} = 480 \text{ кВт}$ мощность исследуемого комплекта АИН-АД в составе ГЧРП $P_{АИН-АД} = 160 \text{ кВт}$, номинальный ток двигателя

$I_{ст.АД.Ном.} = 243 \text{ А}$, ёмкость конденсаторов С-фильтра ЗПН $C_{Ф.ЗПН} = 285000 \text{ мкФ}$, нагрузка АД вентиляторная.

На рис. 7 проиллюстрированы осциллограммы изменения тока статора АД, напряжения на конденсаторе С-фильтра, скорости АД на интервале времени преодоления аварийного режима в питающей сети при применении комбинированной СУ.

При построении СУ ГЧРП по штатной схеме интервал времени $T_{р.упр.}$, в течение которого сохраняется управление приводом после провала напряжения в питающей сети до срабатывания ЗМН, определяется в соответствии с выражением:

$$T_{р.упр.} = \frac{U_{DC.Ном.}^2 - (0,6U_{DC.Ном.})^2 C_{Ф.ЗПН}}{2P_{Дв.}} \quad (14)$$

и составляет $T_{р.упр.} = 0,06 \text{ с}$.

Интервал времени $T_{р.упр.К.СУ'}$ в течение которого сохраняется управление приводом при применении комбинированной СУ для управления ГЧРП в соответствии с осциллограммами, представленными на рис. 7, составляет $t = 1,8 \text{ с}$. Предложенная комбинированная схема СУ позволяет обеспечить управление ЧРП и ГЧРП без остановки АД при кратковременном провале напряжения в питающей сети, без аварийных бросков тока в транзисторах АИН, с сохранением режима управления приводом на всём интервале времени аварийного режима сети $t = 1,8 \text{ с}$, при плавном снижении тока статора АД $I_{ст.}$ по мере разряда конденсатора С-фильтра ЗПН, с последующим нарастанием $I_{ст.}$ до номинального значения без возникновения перегрузки АИН.

Применение комбинированной СУ увеличивает время ожидания восстановления нормального режима сети в 30 раз по сравнению со штатной схемой СУ. Практическое применение разработанной системы управления АИН позволяет сохранить управление приводом на интервале времени включения АВР, а также при возникновении кратковременных провалов напряжения в аварийных режимах питающей сети и устранить аварийную остановку технологического оборудования с вентиляторным характером механической нагрузки.

В настоящее время также проводятся исследования, связанные с возможностью управления ГЧРП в соответствии с предлагаемым способом при векторном режиме управления для практического применения в промышленности.

Список источников

1. Ершов М. С. Устойчивость многомашинных промышленных электротехнических комплексов и систем // Труды VIII Междунар. (XIX Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. 07–09 октября 2014 года: в 2 т. Саранск: Мордовский гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2014. Т. 1. С. 268–274. EDN: TBJJVF.
2. Веселова Н. М., Иванов А. С., Иванова О. А. [и др.] Влияние частотных преобразователей насосных и вентиляционных установок на работу сети внутреннего электроснабжения предприятия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3. С. 82–89. EDN: XCAPP5.
3. Петухов А. В., Климах В. С. Опыт эксплуатации комплекса электроприводов автоматизированных линий по производству шпона // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й Науч.-Техн. конф. студентов и аспирантов, 10–21 апреля 2017 года. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2017. С. 858–860. EDN: YQFJTE.
4. Климах В. С., Петухов А. В. Исследование устойчивости электротехнического комплекса деревообрабатывающей линии к провалам напряжения в сети электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 184–190. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-184-190. EDN: KHAPTJ.
5. Гуревич В. И. Автоматическое повторное включение промышленных электроустановок // Промышленная энергетика. 2005. № 8. С. 8–10. EDN: HTAXHX.
6. Ершов С. В., Жабин Б. А. Особенности определения провалов напряжения в системах электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 8. С. 97–103. EDN: SNUOWR.
7. Петухов А. В., Киба Д. А. Управление электротехническим комплексом с групповым частотно-регулируемым приводом при провалах напряжения в питающей сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 579–584. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-579-580. EDN: GITTLE.
8. Пат. 2740813 Российская Федерация, Н02Р 1/16, Н02Р 3/06. Способ управления электроприводом деревообрабатывающей линии во время автоматического включения резерва / Климах В. С., Петухов А. В. № 2020107224; заявл. 17.02.2020; опубл. 21.01.20219. Бюл. № 3.
9. Гельвер Ф. А., Белоусова Н. В., Самосейко В. Ф., Саушев А. В. Выбор емкости конденсатора звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург: Молодой ученый, 2014. С. 44–47. EDN: QZKIVN.
10. Пат. на полезную модель 181730 Российская Федерация, В27L 5/02. Электропривод деревообрабатывающей линии по производству шпона. Климах В. С., Петухов А. В., Соколовский М. А. № 2017130399; заявл. 28.08.2017; опубл. 26.07.2018. Бюл. № 21.
11. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 651 с. ISBN 5-7782-0323-3. EDN: QMHYUZ.
12. Куделько А. Р. Автоматизированный частотно-регулируемый электропривод с асинхронными двигателями. Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 1992. 182 с.
13. Климах В. С., Петухов А. В. Программный комплекс математической модели электропривода деревообрабатывающей линии в среде MatLab: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611165 от 22.01.2021. Москва: ФИПС, 2021.

ПЕТУХОВ Александр Владимирович, старший преподаватель кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, г. Комсомольск-на-Амуре.
Адрес для переписки: petuhovaleasander@yandex.ru

Для цитирования

Петухов А. В. Разработка и исследование системы управления групповым частотно-регулируемым приводом с повышенной устойчивостью к провалам напряжения в сети // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 76–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-76-83. EDN: EQVFHC.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025 г.
© А. В. Петухов

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE CONTROL SYSTEM OF THE GROUP VARIABLE FREQUENCY DRIVE WITH INCREASED RESISTANCE TO NETWORK VOLTAGE SAGS

The functional scheme of the frequency converter control system is presented, that allows limiting the current surges at the input of the autonomous voltage inverter at the moment of sharp voltage recovery in the supply network. The author describes the research results of the proposed control method in the simulation modeling of a frequency-controlled drive in the MatLab software.

Keywords: power supply system, minimum voltage protection, frequency converter, control system, voltage inverter, common rectifier, voltage dip, frequency regulation, DC link.

References

1. Ershov M. S. Ustoychivost' mnogomashinnykh promyshlennykh elektrotekhnicheskikh kompleksov i system [Stability of multi-machine industrial electrical engineering complexes and systems] // *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. In 2 vols. Saransk, 2014. Vol. 1. P. 268–274. EDN: TBJJVF. (In Russ.).
2. Veselova N. M., Ivanov A. S., Ivanova O. A., Kuznetsova T. A., Nikolaeva S. I. [et al.]. Vliyaniye chastotnykh preobrazovateley nasosnykh i ventilyatsionnykh ustanovok na rabotu seti vnutrennego elektrosnabzheniya predpriyatiya [Influence of frequency converters of pumping and ventilation installations on the operation of the internal power supply network of the enterprise]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2022. No. 3. P. 82–89. EDN: XCAPPS. (In Russ.).
3. Petukhov A. V., Klimash V. S. Opyt ekspluatatsii kompleksa elektroprivodov avtomatizirovannykh liniy po proizvodstvu shpona [Experience of operation of the electric drives complex for automated veneer production lines]. *Nauchno-Tekhnicheskoye Tvorchestvo Aspirantov i Studentov*. Komsomolsk-on-Amur, 2017. P. 858–860. EDN: YQFJTE. (In Russ.).
4. Klimash V. S., Petukhov A. V. Issledovaniye ustoychivosti elektrotekhnicheskogo kompleksa derevoobrabatyvayushchey linii k provalam napryazheniya v seti elektrosnabzheniya [Investigation of the stability of the electrical engineering complex of the woodworking line to voltage failures in the power supply network]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022. No. 3. P. 184–190. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-184-190. EDN: KHAPTJ. (In Russ.).
5. Gurevich V. I. Avtomaticheskoye povtornoye vklyucheniye promyshlennykh elektroustanovok [Auto-reclosing for electrical installation]. *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2005. No. 8. P. 8–10. EDN: HTAXHX. (In Russ.).
6. Ershov S. V., Zhabin B. A. Osobennosti opredeleniya provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya [Features of definition of voltage dips in power supply systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2014. No. 8. P. 97–103. EDN: SNUOWR. (In Russ.).
7. Petukhov A. V., Kiba D. A. Upravleniye elektrotekhnicheskimi kompleksami s gruppovym chastotno-reguliruyemym privodom pri provalakh napryazheniya v pitayushchey seti [Control of an electrical complex with a group frequency-controlled drive in case of voltage failures in the network]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2024. No. 9. P. 579–584. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-579-580. EDN: GITTLE. (In Russ.).
8. Patent 2740813 Russian Federation, H02P 1/16, H02P 3/06. Sposob upravleniya elektroprivodom derevoobrabatyvayushchey linii vo vremya avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva [Method of controlling the electric drive of a woodworking line during automatic activation of the reserve] / Klimash V. S., Petukhov A. V. No. 2020107224. (In Russ.).
9. Gel'fer F. A., Belousova N. V., Samoseyko V. F., Saushchev A. V. Vyboryemkosti kondensatora zvena postoyannogo toka dvukhzvennogo preobrazovatelya chastoty s invertorom napryazheniya [Selection of DC link capacitor size of a two-link frequency inverter with voltage inverter] // *Tekhnicheskiye Nauki: Problemy i Perspektivy*. Saint Petersburg, 2014. P. 44–47. (In Russ.).
10. Patent RU 181730 Russian Federation, B27L 5/02. Elektroprivod derevoobrabatyvayushchey linii po proizvodstvu shpona [Electric drive for wood veneer production line] / Klimash V. S., Petukhov A. V., Sokolovskiy M. A. No. 2017130399. (In Russ.).
11. Zinoviev G. S. Osnovy silovoy elektroniki [Basic power electronics]. Novosibirsk, 2003. 651 p. ISBN 5-7782-0323-3. EDN: QMHYUZ. (In Russ.).

12. Kudelko A. R. Avtomatizirovanny chastotno-reguliruyemy elektroprirod s asinkhronnymi dvigatelyami [Automated frequency-controlled electric drive with asynchronous motors]. Vladivostok, 1992. 182 p. (In Russ.).

13. Klimash V. S., Petuhov A. V. Programmnyy kompleks matematicheskoy modeli elektropivoda derevoobra-batyvayushchey linii v srede MatLab [Software complex of mathematical model of woodworking line electric drive in MatLab]; Certificate No. 2021611165 dated 22.01.2021. Moscow: FIPS, 2021. (In Russ.).

PETUKHOV Alexander Vladimirovich, Senior Lecturer of the Industrial Electronics and Innovative

Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur.

Correspondence address: petuhovaleasander@yandex.ru

For citations

Petukhov A. V. Development and research of the control system of the group variable frequency drive with increased resistance to network voltage sags. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 76–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-76-83. EDN: EQVFHC.

Received January 09, 2025.

© A. V. Petukhov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЩЕТОЧНОГО УЗЛА СИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ГЕНЕРАТОРА

Статья посвящена формированию математической модели процесса изнашивания и оценке остаточного ресурса щеток синхронного тягового генератора. Предлагается учитывать особенности эксплуатации и технического состояния щеточного узла при расчете остаточного ресурса электрических щеток. Проведен анализ массивов данных, собираемых бортовой системой мониторинга, и выявлены необходимые параметры для определения остаточного ресурса электрических щеток. Составлена математическая модель интенсивности износа электрических щеток тягового генератора. Приведен план экспериментального исследования для определения коэффициентов математической модели. Представлена схема экспериментальной установки для определения остаточного ресурса щеток синхронного генератора. Получены зависимости величины остаточного ресурса от изменения параметров рабочих режимов.

Ключевые слова: износ, методика, математическая модель, электрическая щетка, щеточный узел, остаточный ресурс, полнофакторный эксперимент.

Синхронный тяговый генератор является частью тягового электрического привода тепловоза и имеет определенный срок службы. В процессе эксплуатации на узлы тягового генератора тепловоза воздействуют различные внутренние и внешние факторы. Одним из таких узлов является щеточный узел.

В статье для разработки методики определения остаточного ресурса щеточного узла тягового генератора ГТСН-2800 предлагается использовать в качестве исходных данных конструктивные и номинальные параметры тягового генератора, данные локомотивной системы мониторинга и диагностики, результаты экспериментальных исследований по износу электрических щеток.

Принципиальный подход к прогнозированию износа электрощеток, взаимодействующих с контактными кольцами, основан на теоретических положениях, приведенных в [1] и принятых большинством исследователей в данной области [1–5].

Интенсивность износа щетки в основном зависит от силы F , прижимающей щетку, скорости вращения контактного кольца n и тока I , протекающего через графитовую щетку [1, 6]:

$$\frac{\Delta I}{t} = k \cdot n \cdot F(W_0 + W_1 I^\alpha), \quad (1)$$

где α — показатель степени силы тока электрической щетки; W_0 и W_1 — весовые коэффициенты

составляющих износа; k — постоянный коэффициент:

$$k = \frac{\pi \cdot D_k}{60 S_{щ}}. \quad (2)$$

Процесс изнашивания электрических щеток на контактных кольцах синхронного генератора похож на процесс изнашивания на коллекторе электрических машин постоянного тока, однако имеет свои особенности, влияющие на прогнозирование остаточного ресурса. Износ электрощеток на коллекторных машинах постоянного тока разделяют на фрикционную, электрокоррозионную и электроэрозионную составляющие [7–9].

Интенсивность искрения щеток в таких машинах в значительной степени зависит от настройки магнитной системы и в первую очередь — дополнительных полюсов. При моделировании износа электрощеток на кольцах синхронных машин электроэрозионную составляющую не выделяют как независимую, а объединяют с электрокоррозионной. Так как в щеточном узле синхронных машин отсутствует коммутация — процесс переключения секций якорной обмотки, — искрение в нем однозначно является функцией показателей режимов работы щеточного узла (плотности тока в щетке, частоты вращения кольца и нажатия на щетку).

Величина нажатия пружины на щеткодержатель составляет: при изготовлении нового синхронного генератора $17,7 \pm 1,95$ Н ($1,8 \pm 0,2$ кгс); в эксплуатации — не менее 13,7 Н (1,4 кгс).

Назначенный ресурс тягового синхронного генератора ГТСН-2800 при работе локомотивов до капитального ремонта с полной заменой изоляции составляет 2400 тыс. км. Средний срок службы щеток ЭГ4 до замены по износу — 300 тыс. км.

Для формирования математической модели изнашивания щеток и оценки остаточного ресурса щеточного узла синхронного тягового генератора следует выполнить следующие действия:

1) ввести конструктивные и номинальные параметры синхронного генератора;

2) провести анализ массивов данных, собранных бортовой системой мониторинга и содержащих сведения о параметрах режимов работы синхронного тягового генератора в эксплуатации, а также последующую обработку;

3) выполнить эксперименты по износу электрических щеток с учетом различных факторов, влияющих на износ, и их вариаций в диапазонах, которые были получены при помощи бортовой системы мониторинга (пункт 2);

4) выполнить расчет (на основе математической модели) процесса изнашивания электрических щеток и, учитывая результаты математического моделирования, произвести расчет износа и остаточного ресурса электрощеток на текущий момент времени.

В качестве входных данных для определения остаточного ресурса щеточного узла необходимы следующие конструктивные и номинальные параметры синхронного тягового генератора: критическая высота щетки, площадь контактной поверхности щетки, высота новой щетки, остаточная высота щетки на последнем техническом обслуживании, линейные размеры щетки (ширина, длина), сила нажатия рычага щеткодержателя на щетку, количество щеток на кольце тягового генератора, диаметр контактных колец тягового генератора.

Система мониторинга локомотива регистрирует различные показатели электрических машин. Необходимые для моделирования износа щеток данные собираются системой мониторинга локомотива и включают в себя ряд значений: время измерения, скорость локомотива, ток возбуждения тягового генератора, частоту вращения валов дизеля и тягового генератора.

Для формирования функции отклика процесса изнашивания электрических щеток в синхронных

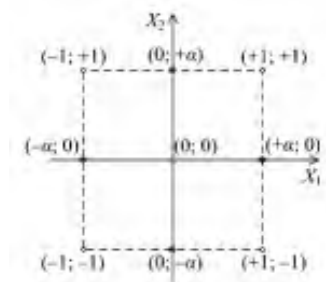


Рис. 1. План эксперимента типа 2^2 со «звездными» точками

машинах с контактными кольцами целесообразно провести экспериментальные исследования и получить уравнение регрессии. Для вычисления коэффициентов регрессии необходимо сформировать план эксперимента.

Ввиду относительно низкой интенсивности износа электрощеток на контактных кольцах синхронного генератора (по сравнению со щетками тяговых коллекторных электродвигателей) и необходимости увеличения времени испытаний, целесообразно минимизировать количество испытаний для определения коэффициентов математической модели с использованием методов планирования эксперимента.

Так как диапазон допустимых значений нажатия щеток в эксплуатации невелик (1,6–2,0 кгс), а изменение силы нажатия в процессе работы щетки не происходит, можно считать варьируемыми факторами только силу тока в щетках и скорость вращения контактных колец. Следовательно, число вариативных факторов в эксперименте равно двум ($k = 2$).

Верхний уровень переменного фактора для удобства регистрации условий эксперимента и обработки экспериментальных данных запишем как +1, нижний уровень внесем как -1, а основной уровень — 0. Мы также предлагаем следующие обозначения: переменный коэффициент (плотность тока щетки) — X_1 ; коэффициент (линейная скорость контактной поверхности кольца) — X_2 ; величина износа щетки — Y .

При выполнении полного факторного эксперимента к основным точкам плана 2^2 и к опытам с параметрами факторов (+1; +1), (+1; -1), (-1; +1), (-1; -1) добавляют некоторое число n_0 опытов в центре плана и четыре «звездные» точки. Добавление опытов необходимо для качественной оцен-

Таблица 1

Содержание плана эксперимента

Содержание плана	Номер опыта	X_1	X_2	Y
План типа 2^2	1	+1	+1	Y_1
	2	-1	+1	Y_2
	3	+1	-1	Y_3
	4	-1	-1	Y_4
«Звездные» точки	5	$+\alpha = +1$	0	Y_5
	6	$-\alpha = -1$	0	Y_6
	7	0	$+\alpha = +1$	Y_7
	8	0	$-\alpha = -1$	Y_8
Нулевая точка	9	0	0	Y_9

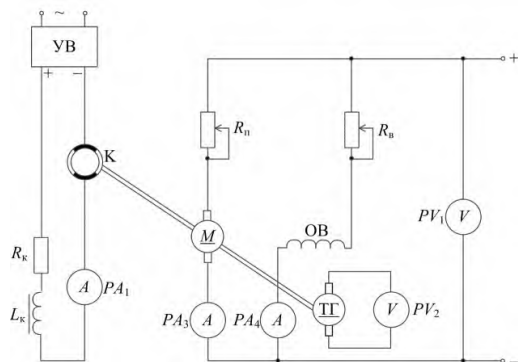


Рис. 2. Схема экспериментального исследования

ки коэффициентов математической модели при $k = 2$. У добавленных опытов плечо обозначается α , а координаты будут $(+\alpha; 0)$, $(-\alpha; 0)$, $(0; +\alpha)$, $(0; -\alpha)$. При ортогональном плане второго порядка значения «звездного» плеча принимают равным $\alpha = 1$ (рис. 1) [10].

Содержание плана эксперимента, включающего значения переменных факторов (X_1, X_2) и измерения износа (Y_1, Y_2) в зависимости от результатов эксперимента, следует обобщить в таблице содержания эксперимента (табл. 1).

Схема экспериментальной установки представлена на схеме экспериментального исследования (рис. 2). Вращение контактных колец экспериментальной установки осуществляется двигателем постоянного тока М. Время измерения каждой точки составляет 120 часов. Измерения проводились с помощью микрометра в трех точках щетки: в середине щетки; в середине рабочей кромки набегающего края; в середине рабочей кромки сбегающего края. Для регулирования силы тока через щетки применялся управляемый выпрямитель (УВ). Частота вращения контактных колец измерялась при помощи тахогенератора (ТГ), установленного на двигателе постоянного тока.

Для получения математической модели необходимо преобразовать уравнение (1). Известно, что коэффициенты модели W_0 и W_1 увеличиваются при возрастании частоты вращения контактных колец [1].

Учет изменения интенсивности износа, обусловленного частотой вращения кольца, происходит при помощи нелинейных возрастающих функций:

$$W_0(n) = k_1 + k_2 n^{d_1}, \quad (3)$$

$$W_1(n) = k_3 + k_4 n^{d_2}. \quad (4)$$

где $k_1 \dots k_4$ — коэффициенты модели; d_1 и d_2 — показатели степеней.

Для того чтобы получить математическое выражение по определению интенсивности износа щетки синхронного генератора с учетом параметров рабочих режимов, преобразуем уравнение (1) путем подстановки в него уравнений (3) и (4):

$$\frac{\Delta I}{t}(F, n, I) = kF(k_1 n + k_2 n^{d_1+1} + k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha). \quad (5)$$

Математическая модель (5) с параметрами рабочих режимов в относительных единицах:

$$\frac{\Delta I}{t}(F, n, I) = kF(k_1 n + k_2 n^{d_1+1} + k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha). \quad (6)$$

Значения уровня интенсивности тока щетки и линейной скорости поверхности кольца в эксперименте были рассчитаны на основе анализа данных, записанных бортовой системой мониторинга. Для определения диапазона варьирования тока, протекающего через щетку, выбираются максимальное и минимальное значения тока возбуждения через щетку. Плотность тока рассчитывается с учетом площади поперечного сечения щетки, сохраняя эксплуатационную плотность.

Щетки не изнашиваются, когда вал дизельного двигателя и тягового генератора неподвижны. Следовательно, данные системы мониторинга, записанные при отключенном дизеле, можно исключить из расчетов, чтобы сократить вычислительные ресурсы, необходимые для моделирования процесса износа щеток. Для определения диапазона частоты вращения ротора синхронного тягового генератора, приводимого в движение дизельным двигателем, выбирается максимальная и минимальная частота вращения ротора. Линейная скорость контактной поверхности кольца в эксперименте устанавливается в соответствии эксплуатации.

Необходимо определить коэффициенты модели (6), при которых отклонения значений интенсивности износа, рассчитанных по выражению и полученных экспериментально с теми же входными данными, будет минимальным среднеквадратичным отклонением:

$$f(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta I}{t}(F, n, I) - Y_{\text{экс.}i} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

где N — количество экспериментов; $Y_{\text{экс.}i}$ — значение интенсивности износа щетки, полученное в результате i -го эксперимента, мм/ч.

Целевую функцию (7) можно записать следующим образом:

$$f(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2) = \sum_{i=1}^N \left(kF \left(\frac{k_1 n + k_2 n^{d_1+1} + k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha}{+ k_3 n I^\alpha + k_4 n^{d_2+1} I^\alpha} \right) - Y_{\text{экс.}i} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Определяем точки экстремума по каждому из коэффициентов для определения k_1, k_2, k_3, k_4 :

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_1} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_2} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_3} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{df(k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha, d_1, d_2)}{dk_4} = 0. \quad (12)$$

В результате получается система уравнений

$$\begin{aligned}
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^2 + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} = F_* \sum_{i=1}^N n_i Y_i; \\
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{2d_2+2} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} = F_* \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+1} Y_i; \\
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^2 + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} = F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i Y_i; \\
& k_1 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} + k_2 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} + k_3 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} + k_4 F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{2d_2+2} = F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+1} Y_i.
\end{aligned} \quad (13)$$

Систему уравнений (13) можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} \\ F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N n_i^{2d_2+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} \\ F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^2 & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} \\ F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_1+1} n_i^{d_2+1} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{d_2+2} & F_*^2 \sum_{i=1}^N I_i^{2a} n_i^{2d_2+2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_* \sum_{i=1}^N n_i Y_i \\ F_* \sum_{i=1}^N n_i^{d_1+1} Y_i \\ F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i Y_i \\ F_* \sum_{i=1}^N I_i^a n_i^{d_2+1} Y_i \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Для заданных постоянных значений показателей степени α , d_1 , d_2 , которые позволяют учитывать нелинейность величины интенсивности износа щетки от входных величин, система уравнений (14) будет линейной, что способствует определению коэффициентов модели k_1 , k_2 , k_3 , k_4 в результате решения системы линейных алгебраических уравнений при разных постоянных значениях показателей степени α , d_1 , d_2 . Данные показатели определяются методом прямого поиска. При вычислениях минимального значения целевой функции (8) приняты следующие диапазоны варьирования показателей степени $\alpha = [0,40; 0,45 \dots 0,60]$, $d_1 = [0,80; 0,85 \dots 1,20]$, $d_2 = [0,80; 0,85 \dots 1,20]$, диапазоны определены методом прямого экспертного анализа.

В результате многократного решения задачи с различными показателями степени найдены значения, при которых целевая функция для заданных экспериментальных данных принимает минимальное значение: $\alpha = 0,55$; $d_1 = 1,00$; $d_2 = 0,95$, а коэффициенты регрессии $k_1(\alpha, d_1, d_2) = 1,034$; $k_2(\alpha, d_1, d_2) = 0,115$; $k_3(\alpha, d_1, d_2) = 0,392$; $k_4(\alpha, d_1, d_2) = 0,0031$.

С учетом полученных значений коэффициентов преобразуем математическую модель (6) для определения интенсивности износа щетки синхронного генератора:

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta I}{I}(F, n, I) = \\
& = F(1,511n + 168 \cdot 10^{-6} n^2 + 31,51 \cdot 10^{-3} n I^{0,55}) 10^{-6}. \quad (15)
\end{aligned}$$

Применяя математическую модель (15), построены зависимости остаточного ресурса при изменении силы нажатия на щетку (рис. 3) и при изменении силы тока через щетку (рис. 4). Производим расчет остаточного ресурса щетки.

Средняя интенсивность износа, мм/ч:

$$\left(\frac{\Delta I}{t} \right)_{cp} = \frac{1}{N_n} \sum_{q=1}^N \left(\frac{\Delta I}{t} \right)_q, \quad (16)$$

где N — количество измерений в массиве данных времени.

Расчётный износ, мм:

$$\Delta I = \frac{T}{3600} \left(\frac{\Delta I}{t} \right)_{cp}, \quad \left(\frac{\Delta I}{t} \right)_{cp} = \frac{1}{N_n} \sum_{q=1}^N \left(\frac{\Delta I}{t} \right)_q, \quad (17)$$

где T — время записи данных измерений системой мониторинга, с.

Текущая (оставшаяся) высота щетки, мм:

$$h_{шост} = h_{ш} - \Delta I, \quad \left(\frac{\Delta I}{t} \right)_q = \frac{1}{N_n} \sum_{q=1}^N \left(\frac{\Delta I}{t} \right)_q, \quad (18)$$

где $h_{ш}$ — высота новой щетки синхронного генератора, мм.

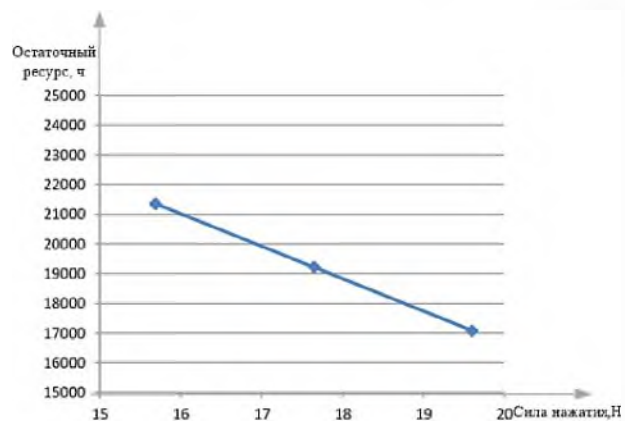


Рис. 3. Изменение остаточного ресурса при изменении силы нажатия

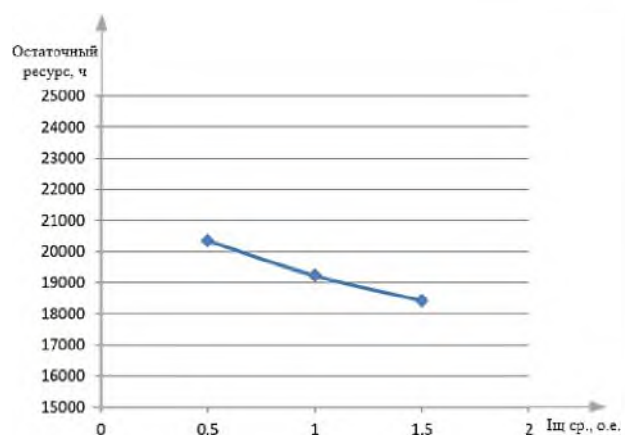


Рис. 4. Изменение остаточного ресурса при изменении силы тока через щетку

Текущая (оставшаяся) рабочая высота щетки, мм:

$$h_{\text{щ.ост.раб}} = h_{\text{щ.ост}} - h_{\text{щ.кр}}, \quad (19)$$

где $h_{\text{щ.кр}}$ — минимально допустимая (критическая) высота щетки генератора, мм.

Текущий остаточный ресурс времени работы щетки, ч:

$$T_{\text{ост}} = \frac{h_{\text{щ.ост.раб}}}{(\Delta I/t)_{\text{ср}}}. \quad (20)$$

Учитывая массив данных, записанный бортовой системой мониторинга параметров рабочих режимов синхронного тягового генератора, остаточный ресурс новой щетки составляет, ч:

$$T_{\text{нов}} = \frac{h_{\text{щ}} - h_{\text{щ.кр}}}{(\Delta I/t)_{\text{ср}}}. \quad (21)$$

Рассчитанный ресурс щетка будет иметь при сохранении средних показателей режимов работы.

Таким образом, приведение исследования позволяет рассчитать остаточный ресурс щеточного узла, учитывая особенности конструкции и параметры рабочих режимов. Математическая модель износа, полученная на основании классических уравнений износа, позволяет учитывать не только изменение факторов, влияющих на износ, но и нелинейность этого изменения благодаря весовым коэффициентам. Полученная математическая модель позволяет оценить текущий износ щетки и остаточный ресурс щеточного узла при изменении его рабочих режимов с помощью информации бортовой системы мониторинга и данных с последнего ТО.

Список источников

1. Плохов И. В., Ильин А. В., Козырева О. И. Структура и алгоритмы имитационного моделирования динамики электрофрикционного взаимодействия // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки. 2014. № 4. С. 192–199. EDN: SISXIT.
2. Изотов А. И., Фоминых А. А., Никулин С. В. [и др.]. Повышение долговечности работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора за счет использования смазывающих щеток, выполненных на основе дисульфида молибдена // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 3. С. 31–37. EDN: ZTSRMX.
3. Изотов А. И., Беспалов В. Я., Фоминых А. А., Мамаев Г. А. Способ повышения ресурса и стабильности работы щеточно-контактного аппарата турбогенератора // Электричество. 2016. № 8. С. 63–67. EDN: WIEKGJ.
4. Качин О. С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2008. 21 с.
5. Качин О. С., Качин С. И. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: моногр. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 165 с.

6. Забоин В. Н. Научно-методологические основы расчета и проектирования систем токосъема электрических машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 32 с.

7. Байсадыков М. Ф. Разработка метода оценки интенсивности изнашивания и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса щеток тяговых электродвигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2020. 20 с.

8. Харламов В. В., Попов Д. И., Байсадыков М. Ф. Разработка способа прогнозирования остаточного ресурса электрощеток тяговых электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 7. С. 182–190. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3282. EDN: CBJWL.

9. Пат. 2757784 Российская Федерация, МПК H01R 39/58. Способ определения остаточного ресурса электрощеток тягового электродвигателя. Харламов В. В., Попов Д. И. № 2021103446; заявл. 11.02.2021; опубл. 21.10.2021. Бюл. № 30.

10. Бойко А. Ф., Воронкова М. Н. Теория планирования многофакторных экспериментов: учебное пособие. Белгород: Изд-во Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. 75 с. EDN: RTDZDP.

МАКАРОВ Артем Сергеевич, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск
SPIN-код: 9485-1606
AuthorID (РИНЦ): 1149772

Адрес для переписки: martyom1597@gmail.com
ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.
SPIN-код: 5093-8463
AuthorID (РИНЦ): 465264
ORCID: 0000-0003-3621-3377
AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgps.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: emoe@omgps.ru

Для цитирования

Макаров А. С., Харламов В. В., Попов Д. И. Моделирование процесса изнашивания и оценка остаточного ресурса щеточного узла синхронного тягового генератора // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 84–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-84-90. EDN: PGKJJD.

Статья поступила в редакцию 12.07.2024 г.
© А. С. Макаров, В. В. Харламов, Д. И. Попов

METHODOLOGY DEVELOPMENT FOR ESTIMATING THE RESIDUAL RESOURCE OF DIESEL LOCOMOTIVE TRACTION GENERATOR BRUSHES

The article presents the formation of a mathematical model of the wear process and estimation of the residual resource of synchronous traction generator brushes. The authors propose to consider the peculiarities of operation and technical condition of the brush assembly in calculating the residual resource of electric brushes. The data arrays collected by the on-board monitoring system are analysed and required parameters for determining the residual resource of electric brushes are identified. The article provides a mathematical model of wear intensity of the traction generator electric brushes. The authors present the experimental research plan for determining the mathematical model coefficients. There is a scheme of experimental installation for determining the residual resource of synchronous generator brushes. The authors obtain dependences of the residual resource value on the change of operating modes.

Keywords: wear, methodology, mathematical model, electric brush, brush assembly, residual resource, full-factor experiment.

References

1. Plokhov I. V., Il'in A. V., Kozyreva O. I. Struktura i algoritmy imitatsionnogo modelirovaniya dinamiki elektrofriksionnogo vzaimodeystviya [Structure and algorithmic steps simulation of the dynamics electro friction engagement]. Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomicheskiye i tekhnicheskiye nauki. *Bulletin of Pskov State University. Series: Economic and Technical Sciences*. 2014. No. 4. P. 192–199. EDN: SISXIT. (In Russ.).
2. Izotov A. I., Fominykh A. A., Nikulin S. V. [et al.]. Povysheniye dolgovechnosti raboty shchetochno-kontaktnogo apparata turbogeneratora za schet ispol'zovaniya smazyvayushchikh shchetok, vypolnennykh na osnove disul'fida molibdena [Increase of the operation durability of the turbogenerator brush-contact apparatus due to the use of lubricating brushes made on the basis of molybdenum disulfide]. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2017. Vol. 5, no. 3. P. 31–37. EDN: ZTSRMX. (In Russ.).
3. Izotov A. I., Bespalov V. Ya., Fominykh A. A., Mamayev G. A. Sposob povysheniya resursa i stabil'nosti raboty shchetochno-kontaktnogo apparata turbogeneratora [Method for increasing the service life and achieving more stable operation of the turbine generator brush-and-contact gear]. Elektrichestvo. *Electricity*. 2016. No. 8. P. 63–67. EDN: WIEKGJ. (In Russ.).
4. Kachin O. S. Povysheniye resursa skol'zyashchego kontakta universal'nykh kollektornykh elektrodvigateley [Increase of the sliding contact resource of the universal collector electric motors]. Tomsk, 2008. 21 p. (In Russ.).
5. Kachin O. S., Kachin S. I. Uvelicheniye resursa skol'zyashchego kontakta elektricheskikh mashin [Increasing the resource of the sliding contact of electrical machines]. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 165 p. (In Russ.).
6. Zaboin V. N. Nauchno-metodologicheskiye osnovy rascheta i proyektirovaniya sistem tokos'yema elektricheskikh mashin [Scientific and methodological bases of calculation and design of current collector systems of electric machines]. Saint Petersburg, 2004. 32 p. (In Russ.).
7. Baysadykov M. F. Razrabotka metoda otsenki intensivnosti iznashivaniya i algoritma prognozirovaniya ostatochnogo resursa shchetok tyagovykh elektrodvigateley [Development of a method for estimation of wear intensity and algorithm for prediction of residual life of brushes of traction electric motors]. Omsk, 2020. 20 p. (In Russ.).
8. Kharlamov V. V., Popov D. I., Baysadykov M. F. Razrabotka sposoba prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektroschetok tyagovykh elektrodvigateley [Development of a method for predicting the residual life of electric traction motor brushes]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. *Inzhiniring georesursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021. Vol. 332, no. 7. P. 182–190. DOI: 10.18799/24131830/2021/7/3282. EDN: CBJIWL. (In Russ.).
9. Patent 2757784 Russian Federation, IPC H01R 39/58. Sposob opredeleniya ostatochnogo resursa elektroschetok tyagovogo elektrodvigateleya [Method for determining the residual life of the traction electric motor electric brushes] / Kharlamov V. V., Popov D. I. No. 2021103446. (In Russ.).
10. Boyko A. F., Voronkova M. N. Teoriya planirovaniya mnogofaktornykh eksperimentov: uchebnoye posobiye [Theory of planning multifactor experiments]. Belgorod, 2020. 75 p. (In Russ.).

MAKAROV Artem Sergeevich, Graduate Student of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 9485-1606

AuthorID (RSCI): 1149772

Correspondence address: martyom1597@gmail.com

KHARLAMOV Viktor Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, 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 the 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

For citations

Makarov A. S., Kharlamov V. V., Popov D. I. Methodology development for estimating the residual resource of diesel locomotive traction generator brushes. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 84–90. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-84-90. EDN: PGKJJD.

Received July 27, 2024.

© **A. S. Makarov, V. V. Kharlamov,
D. I. Popov**

РАСЧЕТ РЕЖИМА ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ФАНЕРНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Безаварийное функционирование элементов системы электроснабжения фанерных производств во многом зависит от поддержания требуемого качества электрической энергии. При проектировании системы электроснабжения фанерных производств необходимо особое внимание уделять расчету режима высших гармоник, т.к. для осуществления технологического процесса по производству фанеры используются мощные полупроводниковые управляемые выпрямители. В статье рассматривается управляемый выпрямитель, который необходим для работы четырехфазового лущильного станка. Авторами установлено, что данный агрегат генерирует в сеть токи высших гармоник, которые оказывают отрицательное влияние на все элементы системы электроснабжения. При этом в настоящее время отсутствует методика расчета режима высших гармоник в системе электроснабжения фанерного производства. Следовательно, целью исследования является разработка методики расчета режима высших гармоник в электрических сетях фанерных производств. Для достижения поставленной цели был проведен эксперимент на действующем фанерном предприятии в Кировской области. В качестве объекта исследования выступил четырехфазовый лущильный станок. В ходе исследования установлено, что высшие гармоники, генерируемые главным приводом лущильного станка, изменяются случайным образом. В расчетах предложено их рассматривать как случайные величины. Определены статистические законы распределения высших гармоник и их числовые характеристики. Получены аналитические выражения для вычисления амплитуд высших гармоник через амплитуду основной гармонической составляющей тока при отсутствии информации об углах управления и коммутации выпрямителя. Предложенная методика позволяет рассчитать амплитудные спектры токов высших гармоник в ветвях и напряжения в узлах системы электроснабжения фанерного производства. Результаты расчетов по предложенной методике рекомендуется использовать для решения ряда практических задач.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрическая сеть фанерного производства, управляемый выпрямитель, лущильный станок, высшие гармоники, несинусоидальность напряжения, режим высших гармоник, методика расчета.

Введение. На сегодняшний день электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой применяются во всех отраслях промышленности, включая объекты деревообрабатывающего комплекса. Нелинейные нагрузки приводят к значительному повышению уровня гармонических составляющих токов и напряжений в системе электроснабжения (СЭС), что способствует снижению качества электрической энергии (КЭЭ).

Высшие гармоники (ВГ) тока и напряжения, наложенные на основную гармонику, негативно влияют на приборы и оборудование [1, 2]. В зависимости от типов имеющихся электроприемников ВГ оказывают либо мгновенные (нарушают работу устройств управления электронных приборов, релейной защиты и автоматики, приводят к возникновению вибраций и акустических шумов, вызывают

появление помех), либо длительные (нагрев и механическая усталость материалов, потери электроэнергии) воздействия, о чем свидетельствуют многие авторы [3–5].

Основные источники гармонических искажений на промышленных предприятиях можно разделить на три группы: статические преобразователи, сварочное и дуговое оборудование, насыщаемые электромагнитные устройства.

Современные фанерные предприятия для осуществления технологического процесса используют частотно-регулируемые электроприводы с преобразователями частоты (ПЧ) и двигатели постоянного тока с управляемыми выпрямителями (УВ). ПЧ и УВ являются нелинейными нагрузками и вносят существенный вклад в искажение кривых тока и напряжения в СЭС. Уровень и спектральный со-

став ВГ, генерируемых ПЧ и УВ, определяется видом устройства, схемотехническими решениями, топологией силовой части, схемой управления вентилями и прочее [6].

В настоящее время методика расчета несинусоидальных режимов в СЭС фанерных производств отсутствует, и выбор параметров СЭС осуществляется без учета ВГ тока и напряжения, присутствующих в электрических сетях. Это приводит к появлению ряда нежелательных последствий. Так, например, на трех обследуемых нами фанерных предприятиях вышли из строя конденсаторные батареи (КБ), применяемые для компенсации реактивной мощности. Причина повреждения КБ во всех случаях одна — резонанс токов на частотах ВГ.

При проектировании СЭС фанерных производств необходимо выполнять расчет режима ВГ электрической сети, который сводится к определению амплитудных спектров токов в ветвях и напряжений в узлах схемы замещения СЭС. Расчет необходим для решения таких задач, как:

- оценка соответствия показателей КЭЭ, относящихся к несинусоидальности кривой напряжения, согласно ГОСТ 32144-2013 [7];

- определение степени влияния токов ВГ на элементы СЭС и загрузки элементов токами ВГ;

- прогнозирование дополнительных потерь электроэнергии вследствие протекания по элементам электрической сети токов ВГ;

- расчет величины ущерба, вызванного наличием гармонических составляющих напряжения и тока;

- выбор мероприятий, направленных на снижение уровня ВГ, подбор и определение оптимальных параметров средств, способствующих повышению КЭЭ.

Основной причиной отсутствия методики расчета несинусоидального режима в электрических сетях фанерных производств является отсутствие сведений о режиме работы УВ шпонового производства. В связи с этим актуальным является исследование режимов работы УВ и разработка эффективных методов расчета режимов ВГ в электрических сетях фанерных производств.

Материалы и методы. Теоретические исследования проводились с применением научно-технического обобщения литературных источников по изучаемой теме, методов расчета электрических цепей переменного тока, методов системного анализа. Для оценки параметров несинусоидального режима выполнено экспериментальное исследование на высокотехнологичном предприятии, специализирующемся на производстве широкоформатной березовой фанеры. Для осуществления технологического процесса на производстве эксплуатируется четырехфазовая линия лущения.

Объектом исследования в данной статье является четырехфазовый лущильный станок (ЛС) фирмы Raute [8]. Главный привод станка — двигатель постоянного тока фирмы Siemens с номинальной мощностью 154 кВт серии 1GG6. Для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный ЛС оснащается УВ Sinamics DCM фирмы Siemens. Для электрической сети УВ является нелинейной нагрузкой и, следовательно, источником ВГ.

Измерение токов ВГ на объекте исследования проводилось сертифицированным и прошедшим государственную поверку анализатором КЭЭ «PQM-701», осуществляющим измерения в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30–2013 [9]. Экспе-

Таблица 1

Числовые характеристики статистических законов распределения гармоник тока УВ на интервале осреднения 10 мин/30 мин

Номер гармоник	M, A	σ, A	D, A	max, A
1	90,8/90,9	30,2/26,3	909,2/690,5	115,3/111,5
5	14,8/14,8	4,9/4,3	23,9/18,3	18,3/17,9
7	8,2/8,2	2,7/2,4	7,3/5,7	10,4/10,1
11	7,9/7,9	2,6/2,3	6,9/5,3	10,1/9,7
13	4,7/4,7	1,6/1,4	2,4/1,8	6,1/5,9
17	4,7/4,7	1,6/1,4	2,5/1,9	6,1/5,8
19	3,2/3,2	1,1/0,9	1,1/0,9	4,2/4,0
23	3,2/3,2	1,1/0,9	1,1/0,9	4,1/3,9
25	2,4/2,4	0,8/0,7	0,6/0,5	3,1/2,9

римент длился одни сутки и проводился в реальных условиях эксплуатации ЛС. Регистрация измеренных значений токов ВГ производилась с интервалом осреднения 10 мин по требованиям ГОСТ 32144–2013 [7].

Результаты. В ходе исследования установлено, что в спектре токов присутствуют канонические и аномальные гармоники, при этом наибольшими по величине являются токи 5, 7, 11, 13 гармоник. Преобладание в спектре данных гармоник объясняется тем, что УВ работает по трехфазной мостовой схеме (схема Ларионова).

Установлено, что параметры режима ВГ в электрических сетях фанерного производства изменяются случайным образом. Процесс изменения параметров режима является стационарным и имеет эргодический характер [10].

На основании полученных экспериментальных данных определены числовые характеристики статистических законов распределения токов ВГ (канонических) четырехфазового ЛС (табл. 1) на интервале осреднения 10 и 30 мин.: математическое ожидание M , среднеквадратичное отклонение σ , дисперсия D и максимальное значение max . В расчетах режимов ВГ предложено рассматривать как случайные величины.

Для интервалов осреднения 10 и 30 мин построены зависимости тока n -ной канонической гармоники I_n от тока первой гармоники I_1 . Поскольку зависимости имеют аналогичный вид, то для примера представлена зависимость $I_5 = f(I_1)$ на интервале осреднения 10 мин (рис. 1).

На этапе проектирования СЭС фанерных производств сведения об углах управления α и коммутации γ вентиля УВ отсутствуют. Это не позволяет для расчета амплитуд ВГ использовать известные выражения, например [11]. Авторами предложено определять амплитуды ВГ тока УВ через ток I_1 , используя результаты измерений, полученных в ходе эксперимента.

Установлено, что зависимость $I_n = f(I_1)$ для интервалов осреднения 10 и 30 мин для канонических гармоник может быть описана линейной функцией, имеющей следующий вид:

$$I_n = a_n \cdot I_1, \quad (1)$$

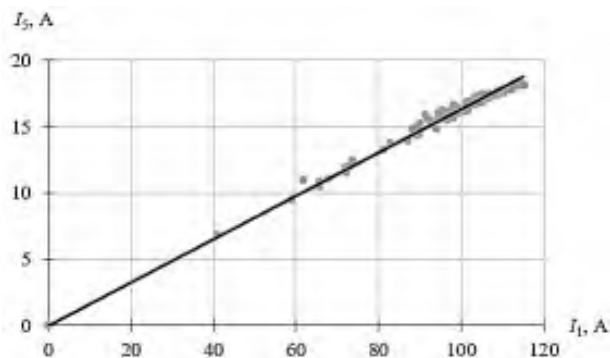


Рис. 1. Аппроксимация зависимости I_5 от I_1 на интервале осреднения 10 мин

Таблица 2

Значения коэффициента a_n

Номер гармоники	Интервал осреднения	
	10 мин.	30 мин.
5	0,163	0,163
7	0,090	0,090
11	0,087	0,087
13	0,051	0,051
17	0,052	0,052
19	0,035	0,035
23	0,035	0,035
25	0,026	0,026

где a_n — коэффициент, представленный рациональным числом; I_1 — среднее значение действующего значения тока основной гармонической составляющей, определенное по результатам эксперимента на интервале осреднения 10 и 30 мин.

На рис. 1 линейная аппроксимация представлена функцией $I_5 = 0,163I_1$, значения коэффициента a_n для канонических гармоник приведены в табл. 2.

При использовании формулы (1) погрешность при расчетах параметров канонических гармоник не превышает 2 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности полученного аналитического выражения для расчета режима ВГ, генерируемых УВ четырехфазного ЛС. Формулу (1) рекомендуется использовать при выполнении расчетов амплитудного спектра тока УВ.

При выполнении расчетов режимов ВГ принимают следующие допущения:

- источники гармоник — симметричные трехфазные нагрузки, которые генерируют в сеть токи ВГ. В данной статье источником гармоник выступает электропривод постоянного тока с УВ четырехфазового ЛС;

- СЭС симметричная и линейная;

- сопротивления элементов СЭС токам ВГ прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми.

Указанные допущения позволяют рассматривать режим для каждой ВГ независимо от режима другой и использовать для определения амплитудных спектров токов и напряжений принцип наложения.

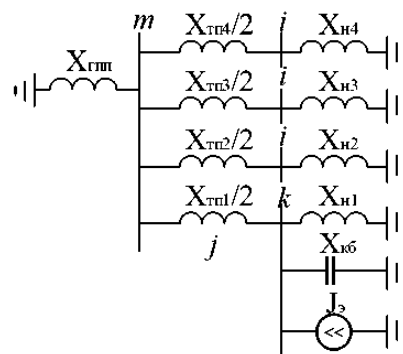


Рис. 2. Расчетная схема замещения СЭС фанерного предприятия:

$X_{ГП}$ — реактивное сопротивление трансформатора ГПП;
 $X_{ТП4/2}$, $X_{ТП3/2}$, $X_{ТП2/2}$, $X_{ТП1/2}$ — реактивные сопротивления трансформаторов ТП; $X_{Н4}$, $X_{Н3}$, $X_{Н2}$, $X_{Н1}$ — реактивные сопротивления комплексных нагрузок;
 $X_{КБ}$ — реактивное сопротивление конденсаторной батареи; J_0 — источник тока бесконечной мощности, в СЭС фанерного предприятия это УВ ЛС;
 i, m — номера узлов, в которых необходимо найти напряжения ВГ;
 k — номера узлов, к которым подключены источники ВГ;
 j — номер ветви, в которой необходимо найти токи ВГ

Точный расчет и анализ режима ВГ в электрических сетях предполагает учет активных сопротивлений. Однако корректный учет активных сопротивлений элементов СЭС — сложная задача. Авторами был произведен расчет режима участка СЭС фанерного предприятия и установлено, что пренебрежение активными сопротивлениями незначительно влияет на результаты расчета. Величина погрешности расчета параметров режима без учета активных сопротивлений не превышает 1 %, следовательно, в дальнейшем активные сопротивления при расчете режима ВГ учитываться не будут.

Алгоритм расчета режима ВГ основан на методе узловых напряжений [12], который предлагается реализовывать следующим образом:

1. Составляется схема замещения для расчета токов ВГ, которая имеет одну фазу и нейтраль, к которой присоединяются нулевые точки схем замещения генераторов, обобщенных нагрузок, двигателей, батарей конденсаторов и емкостных проводимостей кабельных и воздушных линий большой протяженности.

Источники гармонических искажений представляют источниками токов бесконечной мощности канонических ВГ.

Для рассматриваемой СЭС фанерного предприятия схема замещения представлена на рис. 2.

2. Рассчитываются параметры схем замещения элементов СЭС для каждой гармоники. Параметры схем замещения определяются по известным формулам [11].

3. Для канонических гармоник, генерируемых УВ, определяются математическое ожидание $M(I_n)$ и дисперсия $D(I_n)$ по предлагаемым авторами формулам:

$$M(I_n) = m_n M(I_1), \quad (2)$$

$$D(I_n) = d_n M(I_n), \quad (3)$$

Таблица 3

Значения коэффициента d_n

Номер гармоники	Интервал осреднения	
	10 мин.	30 мин.
5	1,608	1,235
7	0,898	0,681
11	0,873	0,662
13	0,523	0,392
17	0,525	0,396
19	0,359	0,268
23	0,354	0,267
25	0,265	0,198

где $M(I_i)$ — математическое ожидание тока основной гармонической составляющей УВ главного привода ЛС на интервале осреднения 30 мин определяется по результатам эксперимента; m_n , d_n — коэффициенты, представленные рациональными числами, принимаем по табл. 2 и 3 соответственно для канонических гармоник.

При расчете суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения аномальные гармоники (четные и кратные трем) предлагается учитывать при помощи поправочного коэффициента, величина которого, согласно результатам экспериментального исследования, равна 1,03.

4. Особенностью схем замещения для расчета режимов ВГ является отсутствие в них источников ЭДС. Это позволяет в качестве балансирующего узла принимать узел 0 «земля», потенциал которого принимается равным нулю. При этом формула для определения математического ожидания напряжения n -й гармоники для каждого узла i , если источник ВГ подключен к узлу k , будет иметь вид:

$$M(U_{ni}) = M(X_{nik} I_{nk}) = X_{nik} M(I_{nk}) = X_{nik} m_n M(I_{1k}), \quad (4)$$

где X_{nik} — узловое реактивное сопротивление между узлами i и k , определяется по прямому методу расчета [13]; $M(I_{nk})$ — математическое ожидание тока n -й гармоники УВ главного привода ЛС, подключенного к узлу k ; $M(I_{1k})$ — математическое ожидание тока основной гармонической составляющей УВ главного привода ЛС, подключенного к узлу k , на интервале осреднения 30 минут.

Дисперсия напряжения n -й гармоники в узле i :

$$D(U_{ni}) = X_{nik}^2 D(I_{nk}) = X_{nik}^2 d_n M(I_{nk}). \quad (5)$$

5. Рассчитывается математическое ожидание $M(I_{nj})$ и дисперсия $D(I_{nj})$ действующего тока n -й гармоники в ветви j схемы замещения:

$$\begin{aligned} M(I_{nj}) &= \frac{M(U_{nm}) - M(U_{nk})}{X_{nj}} = \\ &= \frac{X_{nim} m_n M(I_{1k}) - X_{nik} m_n M(I_{1k})}{X_{nj}} = \\ &= \frac{m_n M(I_{1k})(X_{nim} - X_{nik})}{X_{nj}} = \\ &= Y_{nj} m_n M(I_{1k})(X_{nim} - X_{nik}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} D(I_{nj}) &= \frac{D(U_{nm}) + D(U_{nk}) - 2\sigma_{U_{nm}} \sigma_{U_{nk}} r_{U_{nm}U_{nk}}}{X_{nj}^2} = \\ &= \frac{d_n M(I_{nk})(X_{nim}^2 + X_{nik}^2 - 2X_{nim} X_{nik} r_{U_{nm}U_{nk}})}{X_{nj}^2} = \\ &= Y_{nj}^2 d_n M(I_{nk})(X_{nim}^2 + X_{nik}^2 - 2X_{nim} X_{nik} r_{U_{nm}U_{nk}}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $M(U_{nm})$, $M(U_{nk})$, $D(U_{nm})$, $D(U_{nk})$ — математическое ожидание и дисперсия действующих значений n -й гармоники напряжения в m -м и k -м узлах схемы замещения, к которым присоединена j -я ветвь; X_{nj} — реактивное сопротивление j -й ветви току n -й гармоники; $\sigma_{U_{nm}}$, $\sigma_{U_{nk}}$ — среднеквадратичное отклонение действующего значения n -й гармоники напряжения в m -м и k -м узлах схемы замещения, к которым присоединена j -я ветвь; $r_{U_{nm}U_{nk}}$ — коэффициент корреляции между действующим значением n -й гармоники напряжения в m -м и k -м узлах схемы замещения, к которым присоединена j -я ветвь.

Предложенная методика расчета режима ВГ в электрических сетях фанерных производств может быть использована и при других мощностях электродвигателей главного привода ЛС. Но для уточнения эмпирических коэффициентов, приведенных в данной статье, рекомендуется выполнить дополнительные экспериментальные исследования.

Заключение

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования спектрального состава сетевых токов УВ, работающего с главным приводом четырехфазового ЛС. Установлено, что ВГ УВ изменяются случайным образом. Получены статистические законы распределения ВГ, генерируемых в сеть УВ, и определены их числовые характеристики.

2. Для определения амплитуд канонических ВГ, генерируемых УВ, работающим в составе главного привода ЛС, получены аналитические выражения. Они позволяют при отсутствии сведений об углах управления и коммутации УВ определить амплитуды канонических ВГ через амплитуду основной гармонической составляющей тока. Погрешность расчетов амплитуд ВГ не превышает 2 %.

3. Предложена методика расчета числовых характеристик амплитудных спектров токов в ветвях и напряжения в узлах ВГ СЭС фанерного производства. Результаты расчетов по предложенной методике рекомендуется использовать для решения ряда практических задач, перечисленных выше.

Список источников

- Хворостенко С. В., Авербух М. А. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для ослабления высших гармоник в цеховых сетях электроснабжения с нелинейными потребителями // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1. С. 84–93. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_1_84. EDN: ZAYWAP.
- Нос О. В., Востриков А. С., Штанг А. А., Маляво Е. Ю. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. № 12 (330). С. 28–36. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2389. EDN: YEYDQD.
- Бирюлин В. И., Куделина Д. В. Разработка модели для определения источника высших гармоник в системах электроснабжения // Международный технико-экономический журнал. 2022. № 3. С. 73–87. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-84-3-73-87. EDN: ZLYCDK.

4. Портнягин Н. Н., Ершов М. С., Барбасов П. Ю., Чернев М. Ю. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. № 1 (60). С. 61–66. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66. EDN: XWZQHL.
5. Hu Z., Han Y., Zalhaf A. S., Zhou S. [et al.]. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview // Electric Power Systems Research. 2023. № 218. 109234. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
6. Исаева Т. М. О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции // Главный энергетик. 2016. № 11. С. 32–35. EDN: YGJZXV.
7. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01–07–2014. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.
8. Veneer peeling // Raute. URL: <https://www.raute.com/lines-and-machines/lines/veneer-peeling> (дата обращения: 01.07.2024).
9. ГОСТ 30804.4.30–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01–01–2014. Москва: Стандартинформ, 2014. 58 с.
10. Торопова А. К., Черепанов В. В. Исследование режима высших гармоник в электрических сетях фанерного производства // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. № 1 (67). С. 124–130. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-124-130. EDN: NLRUMY.
11. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промпредприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 252 с. ISBN 5-283-03200-0.
12. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 331 с. ISBN 5-283-0319-8.
13. Гераскин О. Т. Обобщенные параметры электрических сетей. Москва: Энергия: СВИПКэнерго, 1977. 112 с.
-
- ТОРОПОВА Анна Константиновна**, аспирант, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Вятского государственного университета (ВятГУ), г. Киров.
SPIN-код: 2130-8252
AuthorID (РИНЦ): 1121463
ORCID: 0000-0002-4450-7669
ResearcherID: JQI-0198-2023
Адрес для переписки: usr22264@vyatsu.ru
- ЧЕРЕПАНОВ Вячеслав Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение» ВятГУ, г. Киров.
SPIN-код: 1058-6079
AuthorID (РИНЦ): 610927
ORCID: 0009-0004-6940-2961
Адрес для переписки: stud2398@yandex.ru
- Для цитирования**
- Торопова А. К., Черепанов В. В. Расчет режима высших гармоник в электрических сетях фанерных производств // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 91–97. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-91-97. EDN: OHSGDN.
- Статья поступила в редакцию 05.09.2024.**
© А. К. Торопова, В. В. Черепанов

CALCULATION OF THE MODE OF HIGHER HARMONICS IN ELECTRICAL NETWORKS OF PLYWOOD PRODUCTION

The trouble-free operation of the power supply system elements of plywood production largely depends on maintaining the required quality of electric energy. It is essential to focus on calculation of higher harmonics mode at engineering the power supply system of plywood production, as the process uses powerful semiconductor controlled rectifiers. The article discusses the controlled rectifier that is required for the operation of a four-foot veneer peeling machine. The authors determine that the presented unit generates higher harmonic currents into the network. These currents negatively affect all elements of the power supply system. However, there is no calculation method for the mode of higher harmonics in the power supply system of plywood production. Therefore, the purpose of the research is to develop a methodology for calculating the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production. The experiment was conducted at an operating plywood production in the Kirov region to achieve the research purpose. The investigation object was a four-foot veneer peeling machine. It was found that the higher harmonics generated by the main drive of the veneer peeling machine change randomly. The authors proposed to consider them as random variables in the calculations. The research determined statistical laws of the higher harmonics distribution and their numerical features. The authors obtained analytical expressions for calculating the amplitudes of the higher harmonics through the amplitudes of the main harmonic component of the current in the absence of information about the control and switching angles of the rectifier. The proposed technique allows calculating amplitude spectra of higher harmonic currents in branches and voltages in nodes of the power supply system of plywood production. According to the proposed methodology, the results of calculations are recommended for solving series of practical problems.

Keywords: electric power quality, electrical networks of plywood production, controlled rectifier, veneer peeling machine, higher harmonics, non-sinusoidal voltage, mode of higher harmonics, calculation method.

References

1. Khvorostenko S. V., Averbukh M. A. Sintez passivnykh fil'trokom pensiruyushchikh ustroystv dlya oslableniya vysshikh garmonik v tsekhovykh setyakh elektrosnabzheniya s nelineynymi potrebitelyami [Synthesis of passive filter — compensating devices for attenuation higher harmonics in power supply system of workshop with non-linear consumers]. *Intellektual'naya elektrotehnika. Smart Electrical Engineering*. 2019. No. 1. P. 84–93. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_1_84. EDN: ZAYWAP. (In Russ.).
2. Nos O. V., Vostrikov A. S., Shtang A. A., Malyavko E. Yu. Povysheniye energoeffektivnosti proizvodstva za schet primeneniya silovykh fil'trov vysshikh garmonik [Enhancing energy efficiency of industrial production by using power harmonic filters]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. No. 12 (330). P. 28–36. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2389. EDN: YEYDQD. (In Russ.).
3. Biryulin V. I., Kudelina D. V. Razrabotka modeli dlya opredeleniya istochnika vysshikh garmonik v sistemakh elektrosnabzheniya [Model development for determining the source of higher harmonics in power supply systems]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskii zhurnal. The International Technical-Economic Journal*. 2022. No. 3. P. 73–87. DOI: 10.34286/1995-4646-2022-84-3-73-87. EDN: ZLYCDK. (In Russ.).
4. Portnyagin N. N., Ershov M. S., Barbasov P. Yu., Chernev M. Yu. Modelirovaniye vliyaniya velichiny nelineynoy nagruzki na kachestvo elektroenergii promyshlennykh elektrotekhnicheskikh sistem [Modelling influence of nonlinear loading's level on quality of the electric power of electrotechnical systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*. 2017. No. 1 (60). P. 61–66. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-1-61-66. EDN: XWZQHL. (In Russ.).
5. Hu Z., Han Y., Zalhaf A. S., Zhou S. [et al.]. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview. *Electric Power Systems Research*. 2023. No. 218. 109234. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234. (In Engl.).
6. Isayeva T. M. O rezul'tatakh issledovaniya vysshikh garmonik na vysokovol'tnoy podstantsii [Results of researching high harmonics at high voltage substation]. *Glavnyy energetich.*

Chief Power Engineer. 2016. No. 11. P. 32–35. EDN: YGJZXV. (In Russ.).

7. GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 16 p. (In Russ.).

8. Veneer peeling // Raute. URL: <https://www.raute.com/lines-and-machines/lines/veneer-peeling> (accessed: 01.07.2024). (In Engl.).

9. GOST 30804.4.30–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods]. Moscow, 2014. 58 p. (In Russ.).

10. Toropova A. K., Cherepanov V. V. Issledovaniye rezhima vysshikh garmonik v elektricheskikh setyakh fanernogo proizvodstva [Investigation of the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Russian Electromechanics*. 2024. No. 1 (67). P. 124–130. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-124-130. EDN: NLRUMY. (In Russ.).

11. Zhezhelenko I. V., Sayenko Yu. L. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na prompredpriyatiyakh [Power quality in industrial plants]. 3 ed., revised and suppl. Moscow, Energoatomizdat, 2005. 261 p. (In Russ.).

12. Zhezhelenko I. V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. 4 ed., revised and

suppl. Moscow, Energoatomizdat, 2000. 331 p. ISBN 5-283-0319-8. (In Russ.).

13. Geraskin O. T. Obobshchennyye parametry elektricheskikh setey [Generalized parameters of electrical networks]. Moscow, 1977. 112 p. (In Russ.).

TORPOVA Anna Konstantinovna, Graduate Student, Senior Lecturer of the Electricity Supply Department, Vyatka State University (VyatSU), Kirov.

SPIN-code: 2130-8252

AuthorID (RSCI): 1121463

ORCID: 0000-0002-4450-7669

ResearcherID: JQI-0198-2023.

Correspondence address: usr22264@vyatsu.ru

CHEREPANOV Vyacheslav Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Electricity Supply Department, VyatSU, Kirov.

SPIN-code: 1058-6079

AuthorID (RSCI): 610927

ORCID: 0009-0004-6940-2961

Correspondence address: stud2398@yandex.ru

For citations

Toropova A. K., Cherepanov V. V. Calculation of the mode of higher harmonics in electrical networks of plywood production. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 91–97. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-91-97. EDN: OHSGDN.

Received September 05, 2024.

© A. K. Toropova, V. V. Cherepanov

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.317.628

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106

EDN: JXPOUZ

С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ СФЕРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СДВОЕННОГО ТИПА

Для контроля уровней напряженности электрического поля вокруг высоковольтного энергетического оборудования, линий электропередачи, подстанций необходимы простые и удобные в использовании современные датчики. Такие датчики обеспечат технику безопасности и охрану труда обслуживающего персонала энергетического оборудования. В связи с этим разработка датчиков напряженности электрического поля является важной и актуальной задачей. В статье предлагается один из возможных вариантов построения подобных датчиков. Датчик представляет собой двухкомпонентный сферический датчик сдвоенного типа. На сферической проводящей поверхности датчика размещаются изолированно от него двенадцать двуугольных сферических проводящих электродов. Электроды служат для формирования чувствительных элементов четырёх двойных датчиков по два на каждой координатной оси. Устанавливается, что размеры чувствительных элементов датчика влияют на его погрешность, вызванную неоднородностью поля. Сдвоенный сферический датчик обладает знакопеременной погрешностью от неоднородности поля, не превышающей $\pm 1,1\%$ во всем пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 1$, что соответствует минимальному расстоянию до источника поля $d = R$. Погрешность датчика обеспечивается обоснованно выбранными угловыми размерами двенадцати двуугольных сферических электродов датчика основных $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$. Датчик имеет по каждой координатной оси три выхода, два соответствуют одинарным датчикам, а один сдвоенному датчику. Такое конструктивное решение позволяет расширить его функциональные возможности.

Сдвоенный двухкомпонентный датчик может быть использован для построения средств контроля и измерения параметров электрического поля промышленной частоты в зонах с повышенной напряженностью.

Введение. Обзор научно-технической литературы показывает [1–7], что наибольшее распространения получили электроиндукционные датчики напряженности электрического поля (ЭП), основанные на электростатической индукции.

Такие датчики состоят из проводящих тел различных геометрических форм, таких как куб, цилиндр и сфера. Из всех представленных форм, лежащих в основании датчика, наиболее приемлемой является сферическая форма. Из-за отсутствия углов и гладкой поверхности сфера вносит в ЭП минимум искажений, в большей части поддающихся аналитическому расчету. Для снятия сигналов с проводящей сферической поверхности используются чувствительные элементы (ЧЭ), представляющие собой части проводящей сферической поверхности. Обычно ЧЭ в сферических датчиках выполняются в форме полусфер [1–4], сферических сегментов [5, 6] или их частей [7]. ЧЭ датчиков могут включаться в измерительную цепь синфазно и противофазно. Синфазное и противофазное включение ЧЭ датчиков делит датчики на датчики одинарного и двойного типа. Одинарные датчики имеют один, а двойные — два диаметрально противоположных ЧЭ. Одинарные датчики обладают большой совокупностью погрешностей, причиной которых могут быть: электрические помехи, шумы, наводки и неоднородность поля. Двойные датчики за счет противофазного (дифференциального) включения в измерительную цепь ЧЭ значительно уменьшают указанные источники погрешностей одинарных датчиков, поэтому они получили более широкое распространение. Однако погрешность, вызванная неоднородностью поля, уменьшается незначительно и составляет порядка 5–20 %. Следует также отметить, что известные одинарные и двойные датчики имеют ограниченный пространственный диапазон измерения. Обычно он не указывается разработчиками приборов в их технической документации [8–18].

Решить проблемы, связанные с устранением недостатков одинарных и двойных датчиков, позволяет новый тип датчиков — сдвоенные датчики [19, 20].

Сдвоенные датчики расширили номенклатуру одинарных и двойных датчиков. Они представляют собой два двойных датчика, объединенных в единое целое, центры и координатные оси которых совпадают. При этом обязательным требованием к двойным датчикам является противоположность по знаку их погрешностей, вызванных неоднородностью ЭП.

Известные сдвоенные сферические датчики имеют ЧЭ в форме полусфер и сферических сегментов. Расширяя номенклатуру сдвоенных датчиков по форме их ЧЭ и улучшая их возможности, в данной работе исследуется двухкомпонентный сферический датчик напряженности ЭП сдвоенного типа с двугульными ЧЭ.

Постановка задачи

В задачи исследований входит:

1) разработка новых теоретических положений, по взаимодействию датчика, имеющего двугульные сферические электроды с ЭП различной неоднородности;

2) разработка двухкомпонентного сферического датчика напряженности ЭП сдвоенного типа с двенадцатью двугульными ЧЭ;

3) подбор лучших размеров двугульных сферических ЧЭ датчика, обеспечивающих ему минимально возможную погрешность от неоднородности поля в допустимом пространственном диапазоне измерений.

Краткая теория. Полная теория взаимодействия сферических датчиков с ЧЭ в форме сферических многоугольников с ЭП различной неоднородности, таких как однородное поле и поле точечного заряда, рассмотрена в работе [21], а краткая теория работы однокоординатного сферического датчика изложена в работах [22, 23]. Поэтому здесь из краткой теории, изложенной в работах [22, 23], будут приведены только основные формульные выражения, необходимые для пояснения работы двухкомпонентного сферического датчика с ЧЭ в форме сферических двугульников. Угловые размеры сферических двугульников задаются продольным $\alpha = 2\alpha_0$ и поперечным $\beta = 2\beta_0$ углами. Для двугульника угол $\alpha_0 = 90^\circ$, а угол β_0 может принимать значения от 0 до 90° (рис. 1).

В *однородном поле* [22, 23], направленном на диаметрально противоположные ЧЭ, индуцируются электрические заряды

$$q_{1,2\text{одн.}}(t) = \mp 3\pi\epsilon_0 R^2 \sin\beta_0 \cdot E_0(t), \quad (1)$$

где здесь и далее q_1 и q_2 — электрические заряды, индуцированные полем на диаметрально противоположных ЧЭ 1 и ЧЭ 2; знак «–» соответствует ЧЭ 1, в который входит, а знак «+» соответствует ЧЭ 2, из которого выходит вектор напряженности ЭП.

Таким образом, при дифференциальном включении диаметрально противоположных ЧЭ датчика в измерительную цепь дифференциальный электрический будет определяться как

$$\Delta q_{\text{одн.}}(t) = q_{1\text{одн.}}(t) - q_{2\text{одн.}}(t) = 6\pi\epsilon_0 R^2 \sin\beta_0 \cdot E_0(t); \quad (2)$$

В *неоднородном поле точечного заряда* [21] на тех же ЧЭ датчика будут индуцироваться соответствующие электрические заряды

$$q_{1\text{неодн.}}(t) = -6R^2\epsilon \cdot \int_0^\pi \int_0^{\arctg\left(\frac{\tg\beta_0}{\sin\alpha}\right)} \frac{1}{3a} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1-2a\cos\beta+a^2)^3}} - 1 \right] \times \\ \times \cos\beta \cdot d\alpha \cdot d\beta \cdot E(t). \quad (3)$$

$$q_{2\text{неодн.}}(t) = 6R^2\epsilon \cdot \int_0^\pi \int_0^{\arctg\left(\frac{\tg\beta_0}{\sin\alpha}\right)} \frac{1}{3a} \left[\frac{1-a^2}{\sqrt{(1+2a\cos\beta+a^2)^3}} - 1 \right] \times \\ \times \cos\beta \cdot d\alpha \cdot d\beta \cdot E(t). \quad (4)$$

Тогда дифференциальный электрический заряд с диаметрально противоположных ЧЭ датчика определится как

$$\Delta q_{\text{неодн.}}(t) = q_{1\text{неодн.}}(t) - q_{2\text{неодн.}}(t). \quad (5)$$

Выражения (1)–(5) будут положены в основу построения сдвоенного двухкомпонентного сфери-

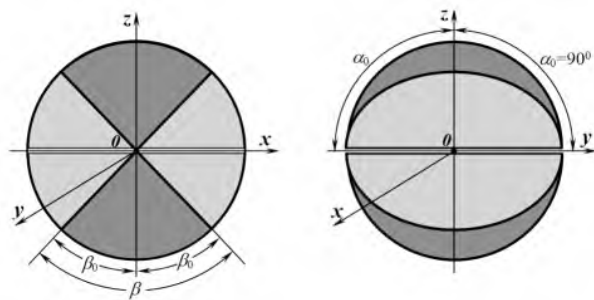


Рис. 1. Сфера с выделенными темным цветом участками её поверхности в форме сферических двуугольников с указанием их угловых размеров

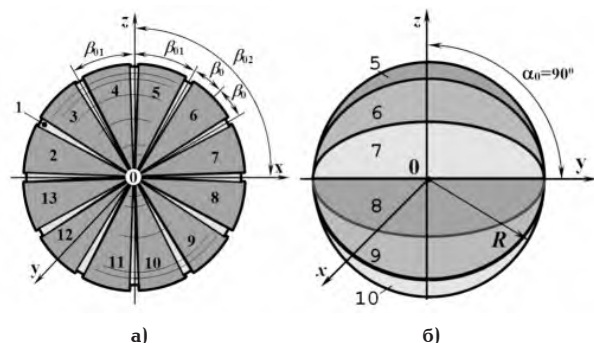


Рис. 2. Двухкомпонентный датчик напряженности ЭП с двенадцатью двуугольными сферическими электродами: а) вид на ось y ; б) вид на ось x

ческого датчика напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников и полусфер.

Сдвоенный двухкомпонентный сферический датчик. Датчик представлен на рис. 2.

В основе датчика лежит проводящее сферическое основание 1 (см. рис. 2) радиуса R , на поверхности которого через изоляционный слой (на рис. 2 не показан) и изолированно друг от друга располагаются двенадцать проводящих двуугольных сферических электродов 2–13 (рис. 2а).

Толщина изоляционного слоя и электродов 2–13 много меньше радиуса R сферического основания датчика, что позволяет считать поверхность датчика единой сферической поверхностью. Если мысленно разбить сферическое основание датчика на две полусферы, то на верхней и нижней полусферах будут находиться по шесть электродов: 2–7 и 8–13, которые можно объединить в диаметрально противоположные пары 2→8, 3→9, 4→10, 5→11, 6→12 и 7→13. Для построения двухкомпонентного датчика расположим его координатные оси x и z в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, как показано на рис. 2. Согласно рис. 2, на координатной оси x расположатся шесть диаметрально противоположных пар электродов 5→11, 6→12, 7→13, 8→2, 9→3 и 10→4. На координатной оси z расположатся диаметрально противоположные пары электродов 2→8, 3→9, 4→10, 5→11, 6→12 и 7→13.

Все электроды датчика, выполненные в форме сферических двуугольников, ограничены двумя угловыми размерами α_0 и β_0 , (см. рис. 2). Для двуугольного сферического электрода первый угловой размер $\alpha_0 = 90^\circ$, а второй β_0 определяется требуемой погрешностью от неоднородности ЭП.

Из представленной системы электродов датчика можно сформировать одинарный, двойной и сдво-

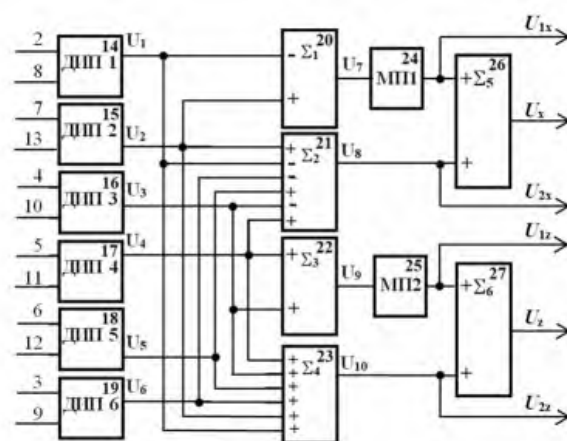


Рис. 3. Измерительная цепь сдвоенного датчика напряженности ЭП

енный двухкомпонентный датчики [1–4, 24]. Одинарные и двойные датчики хорошо известны. Они обладают рядом достоинств и недостатков. Общим их недостатком является высокая погрешность при измерении неоднородных ЭП. На смену им пришли сдвоенные датчики [24, 25], состоящие из двух двойных датчиков. Главный недостаток сдвоенных датчиков — сложность их конструктивного решения, однако малая погрешность при измерении неоднородных ЭП сводит на нет сложность их конструктивного изготовления. В связи с этим в работе будем рассматривать построение сдвоенного двухкомпонентного датчика, состоящего из двенадцати двуугольных сферических электродов.

Сформируем из двенадцати электродов двухкомпонентный сдвоенный датчик. По каждой координатной оси будут использоваться шесть пар электродов. Из шести пар электродов, расположенных на координатных осях x и z , сформируем два двойных датчика, входящих в состав сдвоенного датчика на соответствующей координатной оси. Первый двойной датчик по оси x будет состоять из диаметрально противоположных пар объединенных электродов 7+8→2+13. Второй двойной датчик по оси x сформируем из диаметрально противоположных пар объединенных электродов 5+6+7+8+9+10→2+3+4+11+12+13. Объединенные пары электродов второго двойного датчика формируют ЧЭ в форме полусфер (вырожденные сферические двуугольники). Аналогично ЧЭ первого двойного датчика по оси z будут состоять из объединенных электродов 4+5 и 10+11, а второго двойного датчика — из объединенных электродов 2+3+4+5+6+7 и 8+9+10+11+12+13.

Объединение электродов сдвоенного датчика осуществляется посредством измерительной цепи (рис. 3).

Измерительная цепь состоит из шести дифференциальных измерительных преобразователей 14–19 ДИП1 — ДИП6, шести сумматоров 20–23 и 26, 27 и двух масштабных преобразователей 24, 25 МП1 и МП2. Сумматоры 20, 22, 26 и 27 имеют два входа (у сумматора 20 один вход инвертирующий, обозначен минусом «–», а у сумматоров 22, 26 и 27 все входы неинвертирующие, обозначены плюсом «+»). Сумматоры 21, 23 имеют шесть входов (у сумматора 21 три инвертирующих, обозначены минусом «–» и три неинвертирующих входа, обозначены плюсом «+»), а у сумматора 23 шесть входов неинвертирующих обозначены плюсом

«+»), масштабные преобразователи 24 и 25 служат для выравнивания выходных сигналов первого и второго двойного датчика, находящихся на координатных осях x и z соответственно. Выравнивание выходных сигналов датчика должно выполняться в однородном поле.

В качестве измерительных преобразователей 14–19 используются дифференциальные интеграторы тока. Особенностью интеграторов тока является близкий к нулю входной импеданс и независимость выходного напряжения от частоты входного сигнала.

Сумматоры объединяют дифференциальные сигналы с электродов датчика и формируют выходной сигнал сдвоенного датчика.

Двухкомпонентный сферический сдвоенный датчик в электрическом поле. Идеей создания сдвоенных датчиков послужил новый метод измерения напряженности ЭП по среднему значению [20]. Реализация метода требует одновременного измерения в одной точке поля двух значений напряженности $E_1(t)$ и $E_2(t)$. В связи с чем возникла необходимость помещать в данную точку поля два датчика, имеющих противоположные по знаку погрешности, результат измерения $E(t)$ определять как среднее значение из измеренных значений $E_1(t)$ и $E_2(t)$, т.е.

$$E(t) = [E_1(t) + E_2(t)]/2. \quad (6)$$

В однородном поле $E_1(t) = E_2(t)$, а следовательно, $E(t) = E_1(t) = E_2(t)$. В неоднородном поле из-за погрешности, вызванной неоднородностью поля $E_1(t) \neq E_2(t)$, тогда, в этом случае, $E(t)$ будет равно среднему значению из $E_1(t)$ и $E_2(t)$. С учетом сказанного рассмотрим работу двухкомпонентного сферического сдвоенного датчика в полях различной неоднородности. В качестве таких полей выберем однородное поле свободного пространства и неоднородное поле точечного источника.

Однородное поле. В исследуемую точку однородного ЭП помещают датчик. Под действием поля на проводящих электродах датчика 2–13 индуцируются электрические заряды. Обозначим заряды, индуцированные на электродах датчика номерами соответствующих электродов и эти номера присвоим входам ДИП 1–ДИП 6 (см. рис. 3). С помощью ДИП 14–19 заряды с пар 2–8, 3–9, 4–10, 5–11, 6–12 и 7–13 проводящих электродов преобразуются в напряжения $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $U_4(t)$, $U_5(t)$ и $U_6(t)$. Эти напряжения пропорциональны разности зарядов с пар проводящих электродов 2–8, 3–9, 4–10, 5–11, 6–12 и 7–13. Эти напряжения будут соответственно равны

$$U_1(t) = k\Delta q_1(t) = k[q_2(t) - q_8(t)];$$

$$U_2(t) = k\Delta q_2(t) = k[q_7(t) - q_{13}(t)];$$

$$U_3(t) = k\Delta q_3(t) = k[q_4(t) - q_{10}(t)];$$

$$U_4(t) = k\Delta q_4(t) = k[q_5(t) - q_{11}(t)];$$

$$U_5(t) = k\Delta q_5(t) = k[q_6(t) - q_{12}(t)];$$

$$U_6(t) = k\Delta q_6(t) = k[q_3(t) - q_9(t)],$$

где k — коэффициент преобразования дифференциальных измерительных преобразователей 14–19.

Из этих напряжений формируются напряжения выходных сигналов четырех двойных датчиков

два по координатной оси x и два по координатной оси z .

По координатной оси x из проводящих электродов формируются два двойных датчика. Первый датчик формируется из диаметрально противоположных пар электродов 7+8→2+13, а второй — из диаметрально противоположных пар электродов 5+6+7+8+9+10→2+3+4+11+12+13. Первому и второму датчику соответствуют напряжения $U_7(t)$ и $U_8(t)$, сформированные на выходах сумматоров 20 и 21:

$$\begin{aligned} U_7(t) &= U_2(t) - U_1(t) = \\ &= k[q_7(t) - q_{13}(t)] - k[q_2(t) - q_8(t)] = \\ &= k\{[q_7(t) + q_8(t)] - [q_2(t) + q_{13}(t)]\} = \\ &= 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} \cdot E_{0x}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_8(t) &= U_1(t) - U_2(t) - U_3(t) + U_4(t) + U_5(t) - U_6(t) = \\ &= k[q_2(t) - q_8(t)] - k[q_7(t) - q_{13}(t)] - k[q_4(t) - q_{10}(t)] - \\ &- k[q_5(t) - q_{11}(t)] + k[q_6(t) - q_{12}(t)] - k[q_3(t) - q_9(t)] = \\ &= k\{[q_5(t) + q_6(t) + q_7(t) + q_8(t) + q_9(t) + q_{10}(t)] - \\ &- [q_2(t) + q_3(t) + q_4(t) + q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)]\} = \\ &= 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} \cdot E_{0x}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Из выражения (7) видно, что сумматор 20 объединяет сигналы с электродов 7, 8 и 2, 13 и формирует диаметрально противоположные ЧЭ первого датчика, состоящие из электродов 7+8 и 2+13. Таким образом, ЧЭ первого двойного датчика, расположенные по оси x , представляют собой двуугольники с угловыми размерами $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$. С учетом углового размера $\beta_{01} = 30^\circ$ выражение (7) можно записать

$$U_7(t) = 3k\pi\epsilon_0 R^2 \cdot E_{01x}(t). \quad (9)$$

Выражение (8) показывает, что сумматор 21 объединяет сигналы с электродов 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 2, 3, 4, 11, 12, 13 и формирует диаметрально противоположные ЧЭ второго двойного датчика, состоящие из электродов 4+6+7+8+9+10 и 2+3+4+11+12+13. Таким образом, чувствительные элементы второго двойного датчика по оси x представляют собой полусферы с угловыми размерами $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{02} = 90^\circ$. Тогда для выходного напряжения второго двойного датчика с учетом выражения (8) можно записать

$$U_8(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \cdot E_{02x}(t). \quad (10)$$

Аналогично рассуждая, получим выходные напряжения первого и второго двойных датчиков по координатной оси z .

Выходной сигнал первого двойного датчика $U_9(t)$ по оси z формируется на выходе сумматора 22. Он будет определяться суммой напряжений $U_3(t)$ и $U_4(t)$

$$\begin{aligned} U_9(t) &= U_3(t) + U_4(t) = \\ &= k[q_4(t) - q_{10}(t)] + k[q_5(t) - q_{11}(t)] = \\ &= k\{[q_4(t) + q_5(t)] - [q_{10}(t) + q_{11}(t)]\} = \\ &= 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} \cdot E_{0z}(t) = 3k\pi\epsilon_0 R^2 \cdot E_{0z}(t), \end{aligned} \quad (11)$$

т.к. для ЧЭ 4+5 и 10+11 имеют угловой размер, как будет показано ниже, $\beta_{01} = 30^\circ$.

Выходной сигнал второго двойного датчика $U_{10}(t)$ по оси z формируется на выходе сумматора 23. Он

будет определяться суммой шести напряжений $U_1(t) - U_6(t)$ учетом их знаков

$$U_{10}(t) = U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) + U_4(t) + U_5(t) + U_6(t) = \\ = k \left\{ [q_2(t) + q_3(t) + q_4(t) + q_5(t) + q_6(t) + q_8(t)] - \right. \\ \left. - [q_8(t) + q_9(t) + q_{10}(t) + q_{11}(t) + q_{12}(t) + q_{13}(t)] \right\} = \\ = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} \cdot E_{0z}(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \cdot E_{0z}(t), \quad (12)$$

т.к. для ЧЭ $2+3+4+5+6+7$ и $8+9+10+11+12+13$ угловой размер $\beta_{02} = 90^\circ$.

В свою очередь выходные напряжения $U_7(t)$ и $U_8(t)$ датчиков, расположенных на оси x , соответственно пропорциональны составляющим вектора напряженности измеряемого ЭП E_{01x} и E_{02x} , а выходные напряжения $U_9(t)$ и $U_{10}(t)$ датчиков, расположенных на оси z , соответственно пропорциональны напряженностям измеряемого электрического поля E_{01z} и E_{02z} .

В однородном поле должны выполняться условия равенства напряженностей $E_{1x}(t) = E_{2x}(t)$ и $E_{1z}(t) = E_{2z}(t)$, а следовательно, и напряжений $U_7(t) = U_8(t)$ и $U_9(t) = U_{10}(t)$. Из-за разного числа проводящих электродов, участвующих в формировании выходных напряжений первых и вторых двойных датчиков в однородном поле напряжения $U_7(t) \neq U_8(t)$ и напряжения $U_9(t) \neq U_{10}(t)$. Следовательно, $E_{01x} \neq E_{02x}$ и $E_{01z} \neq E_{02z}$. Для правильной работы сдвоенного датчика необходимо обеспечить в однородном поле выполнение условий $U_7(t) = U_8(t)$ ($E_{01x}(t) = E_{02x}(t)$) и $U_9(t) = U_{10}(t)$ ($E_{01z}(t) = E_{02z}(t)$). Выполнение этих условий обеспечивается один раз в процессе эксплуатации датчика. Для этого датчик вносится в однородное ЭП и поочередно ориентируется по координатным осям x и z . С помощью масштабных преобразователей 24 МП1 и 25 МП2 (см. рис. 3) добиваются равенства напряжений $E_{01x}(t) = E_{02x}(t)$ и $E_{01z}(t) = E_{02z}(t)$. Для этого в измерительной цепи предусмотрены выходы U_{1x} , U_{2x} и U_{1z} , U_{2z} . При выполнении этих условий датчик готов к работе.

Из выражений (9), (10) и (11), (12) следует, что $U_8(t) = 2U_7(t) = U_7^*(t)$ и $U_{10}(t) = 2U_9(t) = U_9^*(t)$ и $U_9(t)$ напряжения после масштабных преобразователей 24 и 25. Тогда напряжения $U_7^*(t)$ и $U_8^*(t)$ будут представлять собой выходные напряжения $U_{1x}(t)$ и $U_{2x}(t)$, пропорциональные составляющей напряженностям ЭП $E_{01x}(t)$ и $E_{02x}(t)$ и соответствующие первым и вторым двойным датчиков, расположенных по координатной оси x . В то же время $U_9^*(t)$ и $U_{10}^*(t)$ будут представлять собой выходные напряжения $U_{1z}(t)$ и $U_{2z}(t)$, пропорциональные составляющей напряженностям ЭП $E_{01z}(t)$ и $E_{02z}(t)$ соответствующие первым и вторым двойным датчиков, расположенных по координатной оси z .

Тогда, согласно методу измерения напряженности ЭП по среднему значению [27] и выражению (6), заложенному в работу сдвоенного датчика выходные напряжения $U_x(t)$ и $U_z(t)$ сдвоенных датчиков по координатной оси x и z , пропорциональные составляющим $E_{0x}(t)$ и $E_{0z}(t)$ вектора напряженности ЭП, определяются следующим образом

$$U_x(t) = \frac{U_{1x}(t) + U_{2x}(t)}{2} = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} \cdot E_{0x}(t); \quad (13)$$

$$U_z(t) = \frac{U_{1z}(t) + U_{2z}(t)}{2} = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} \cdot E_{0z}(t). \quad (14)$$

Напряжения $U_x(t)$ и $U_z(t)$ пропорциональны измеряемым составляющим вектора напряженности ЭП

$$E_{0x}(t) = kU_x(t) = \frac{E_{01x}(t) + E_{02x}(t)}{2}$$

и

$$E_{0z}(t)U_z(t) = kU_z(t) = \frac{E_{01z}(t) + E_{02z}(t)}{2}.$$

Таким образом, полученное выходное напряжение $U_x(t)$ и $U_z(t)$ сдвоенного датчика пропорционально среднему значению составляющих вектора напряженности ЭП $E_0(t)$.

Неоднородное поле. В отличие от однородного поля, в неоднородном поле $U_{1x}^n(t) \neq U_{2x}^n(t)$ и $U_{1z}^n(t) \neq U_{2z}^n(t)$. Неравенство выходных напряжений двойных датчиков по координатным осям x и z обусловлено погрешностями двойных датчиков, вызванными неоднородностью поля.

Поэтому выражения (7), (8) и (11), (12) для напряжений двойных датчиков по координатным осям x и z необходимо представить с учетом погрешностей

$$U_{1x}^n(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0x}(t) = \\ = G_x [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0x}(t); \quad (15)$$

$$U_{2x}^n(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0x}(t) = \\ = G_x [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0x}(t); \quad (16)$$

$$U_{1z}^n(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t) = \\ = G_z [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t); \quad (17)$$

$$U_{2z}^n(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{02} [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0z}(t) = \\ = G_z [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0z}(t), \quad (18)$$

где индекс «н» у обозначений напряжений указывает на их принадлежность к неоднородному полю; $\delta_1(a, \beta_{01})$, $\delta_2(a, \beta_{02})$ — взаимно противоположные по знаку погрешности от неоднородности поля двойных датчиков; $a = R/d$ — пространственный диапазон измерения, характеризующий степень неоднородности поля; R — радиус сферического основания датчика; d — расстояние от центра сферического основания датчика до источника поля. Аналогично, выходные напряжения $U_x^n(t)$ и $U_z^n(t)$ сдвоенного датчика по составляющим модуля вектора напряженности ЭП, определяемые выражениями (13) и (14) с учетом погрешностей от неоднородности поля можно представить в виде

$$U_x^n(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta(a, \beta_{01})] \cdot E_{0x}(t); \quad (19)$$

$$U_z^n(t) = 6k\pi\epsilon_0 R^2 \sin \beta_{01} [1 + \delta(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t), \quad (20)$$

где $\delta(a, \beta_{01})$ — погрешность от неоднородности поля составляющих сдвоенного датчика.

Погрешность $\delta(a, \beta_{01})$ сдвоенного датчика, вызванную неоднородностью поля, по его составляющим можно найти на примере составляющей по оси z . Для этого воспользуемся выражениями (17) и (18) и проведем следующие преобразования

$$U_z(t) = \frac{U_{1z}^n(t) + U_{2z}^n(t)}{2} = \\ = \frac{G_z [1 + \delta_1(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t) + G_z [1 + \delta_2(a, \beta_{02})] \cdot E_{0z}(t)}{2} = \\ = G_z [1 + \delta(a, \beta_{01})] \cdot E_{0z}(t), \quad (21)$$

где

$$\delta(a, \beta_{01}) = \frac{\delta_1(a, \beta_{01}) + \delta_2(a, \beta_{02})}{2} \quad (22)$$

— результирующая погрешность составляющих модуля вектора напряженности ЭП $E_0(t)$ сдвоенного датчика, вызванная неоднородностью поля.

Погрешность $\delta_1(a, \beta_{01})$ первого двойного датчика с ЧЭ в форме сферических двуугольников находится из выражения

$$\delta_1(a, \beta_{01}) = \frac{\Delta q_{\text{неодн.}}(a, \beta_{01}) - \Delta q_{\text{одн.}}(\beta_{01})}{\Delta q_{\text{одн.}}(\beta_{01})} \cdot 100 \%, \quad (23)$$

где $\Delta q_{\text{одн.}}(\beta_0)$ и $\Delta q_{\text{неодн.}}(a, \beta_0)$ определяются выражениями (2) и (5) с учетом выражений (1)–(4).

Для второго двойного датчика с ЧЭ в форме полусфер ($\beta_{02} = 90^\circ$) погрешность $\delta_2(a, \beta_{02}) = \delta_2(a)$ определится выражением [26, 27]

$$\delta_2(a) = - \left[1 - \frac{2}{3a^2} \cdot \left(1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+a^2}} \right) \right] \cdot 100 \%. \quad (24)$$

Представленная теория положена в основу математической модели для проведения математического моделирования работы сдвоенного датчика в полях различной неоднородности и выявления лучших угловых размеров его ЧЭ.

Математическое моделирование, проведенное в математическом редакторе Mathcad, позволило выявить лучшие угловые размеры β_{01} двуугольных составных сферических ЧЭ в широком пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. Результаты моделирования в виде графика представлены на рис. 4.

При моделировании датчик перемещался в ЭП из бесконечности ($d \gg R$, где d — расстояние от центра датчика до источника поля; R — радиус датчика) к источнику поля до ($d \leq R$) вдоль оси x , а затем вдоль оси z . Из рис. 4 следует, что в пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$ погрешность датчика изменяется от отрицательной, принимающей минимальное значение минус 0,22 %, до положительной, принимающей максимальное значение плюс 1,1 %.

В связи с этим рассматриваемый двухкомпонентный сферический сдвоенный датчик будет обладать погрешностью $\pm 1,1$ % во всем пространственном диапазоне измерений $0 \leq a \leq 1$. Тогда лучшим угловым размером двуугольного ЧЭ датчика будет $\beta_{01} = 30^\circ$. Такие размеры попарно будут иметь ЧЭ 4, 5–10, 11 и 7, 8–2, 13. Остальные ЧЭ сдвоенного датчика будут иметь угловые размеры $\beta_0 = 15^\circ$.

Выводы и заключение. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложено конструктивное решение двухкомпонентного сдвоенного сферического датчика напряженности электрического ЭП с двенадцатью ЧЭ в форме сферических двуугольников.

2. Датчик имеет по каждой координатной оси три выхода, два соответствуют одинарным датчикам, а один сдвоенному датчику. Такое конструктивное решение позволяет расширить функциональные возможности датчика.

3. Сдвоенный датчик обладает знакопеременной погрешностью от неоднородности поля, не превышающей $\pm 1,1$ % во всем пространственном диапазоне $0 \leq a \leq 1$.

4. Погрешность датчика обеспечивает обоснованно выбранные угловые размеры двенадцати двуугольных сферических электродов датчика $\alpha_0 = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$.

В заключение необходимо сказать, что предложенный в работе двухкомпонентный сфериче-

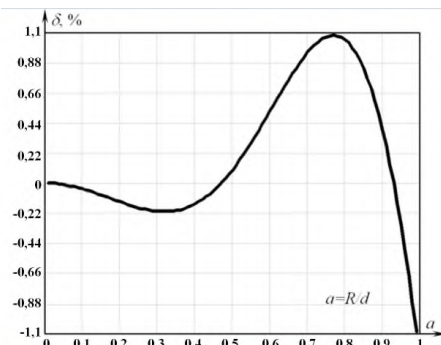


Рис. 4. График погрешности сдвоенного датчика для углового размера его ЧЭ в форме двуугольника $\alpha_{01} = 90^\circ$ и $\beta_{01} = 30^\circ$

ский сдвоенный датчик напряженности ЭП с ЧЭ в форме сферических двуугольников имеет определенные перспективы для использования в составе средств измерения напряженности ЭП. На следующем этапе необходимо рассмотреть возможность построения подобных сдвоенных трехкомпонентных сферических датчиков.

Список источников

1. Дез Ж., Пиррот П. Расчет и измерение напряженности электрического поля вблизи устройств высокого напряжения // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: переводы докл. Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-76) / Под ред. Ю. П. Шкарина. Москва: Энергия, 1979. С. 10–19.
2. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ electrique alternatif 50 Hz // Rev. gen. elec. 1988. № 7. Р. 27–38.
3. Прибор для измерения электрического поля ИНЭП-50. URL: https://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC (дата обращения: 10.12.2024).
4. Мисакян М., Коттер Ф. Р., Калер Р. Л. Миниатюрный датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1978. № 7. С. 52–55.
5. Щигловский К. Б., Аксельрод В. С. Приборы для измерения параметров электростатического поля и их калибровка // Измерительная техника. 1978. № 5. С. 63–65.
6. Бирюков С. В., Ложников В. Я. Цифровой измеритель напряженности электрического поля промышленной частоты // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 275.
7. Бирюков С. В., Кац Р. А., Ложников В. Я. [и др.]. Расчет и измерение напряженности электрического поля в электроустановках сверх- и ультравысокого напряжения // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: переводы докл. Междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-76). Москва: Энергоатомиздат, 1988. С. 6–13.
8. Измеритель ближнего электромагнитного поля ЭЛОН. URL: https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosi0t/5_09 (дата обращения: 10.12.2024).
9. Измеритель напряженности ИНЭП-8. URL: <http://granat-e.ru/inep-8.html> (дата обращения: 10.12.2024).
10. Измеритель напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты ПЗ-50. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50> (дата обращения: 10.12.2024).
11. Измеритель переменного электрического поля ИЭП-04. URL: <https://www.ccenter.msk.ru/cat/1832/izmeritel-elektricheskogo-polya-iep-04-izmerenie-napryajennosti> (дата обращения: 10.12.2024).
12. Измеритель напряженности ЭП промышленной частоты ГРАДАН. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_

polya_promishlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html (дата обращения: 10.12.2024).

13. Индикатор параметров ЭМП промышленной частоты РАДЭКС ЭМИ 50. URL: <https://www.izotop.ru/test/ИнструкцияЕМИ50.pdf>. (дата обращения: 10.12.2024)

14. Field Analyzer System EFA-3. URL: https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf (дата обращения: 10.12.2024).

15. Измеритель электрического поля промышленной частоты BE-50. URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (дата обращения: 10.12.2024).

16. Измеритель параметров электрического и магнитного полей BE-метр. URL: https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf (дата обращения: 10.12.2024).

17. Портативный анализатор электромагнитного поля EFA-300. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf. (дата обращения: 10.12.2024).

18. Изотропный измеритель электромагнитного поля ПЗ-60. URL: <http://ciklon-pribor.ru> (дата обращения: 10.12.2024).

19. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Метод измерения напряженности неоднородных электрических полей по среднему значению // Омский научный вестник. 2021. № 4 (178). С. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM.

20. Бирюков С. В., Тюкина Л. В. Модернизированный метод измерения напряженности электрического поля по среднему значению двоянными датчиками и устройства для его реализации // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 3. С. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVMDJ.

21. Бирюков С. В., Шиликов А. С. Датчик напряженности электрического поля с электродами в форме сферических многоугольников // Омский научный вестник. 2002. Вып. 18. С. 123–127.

22. Wilhelmy L. Sonde zur potenzialfreien Messung der periodischen und transienten elektrischen Feldstärke // Elektrotechnische Zeitschrift. 1973. A Bd. 94. № 8. S. 441–445.

23. Миролюбов Н. Н., Костенко М. В., Левинштейн М. Л. [и др.]. Методы расчёта электростатических полей. Москва: Высшая школа, 1963. 415 с.

24. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Сдвоенные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67. EDN: AVJDSB.

25. Бирюков С. В., Тюкина Л. В., Тюкин А. В. Сдвоенный сферический датчик напряженности электрического поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17, № 5. С. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012. EDN: DZPPSE.

26. Kaidanov F. G., Kats R. A., Biryukov S. V., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p.

27. Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Проектирование электроиндукционных датчиков и средств измерений электрических полей: моногр. Санкт-Петербург: ООО Реноме, 2022. 180 с. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. EDN: DXISMN.

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры физики Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 9384-0078

ORCID: 0000-0002-1362-9911

AuthorID (SCOPUS): 7006438919

Адрес для переписки: sbiryukov154@mail.ru

Для цитирования

Бирюков С. В. Двухкомпонентный сферический датчик напряженности электрического поля сдвоенного типа // Омский научный вестник. 2025. № 1 (193). С. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ.

Статья поступила в редакцию 17.12.2024 г.

© С. В. Бирюков

TWO-COMPONENT SPHERICAL DUAL-TYPE ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSOR

Simple and easy-to-use modern sensors are required to monitor the levels of electric field strength around high-voltage power equipment, power lines, substations. These sensors ensure safety and labour protection of power equipment maintenance personnel. Therefore, the development of electric field strength sensors is an important and urgent task. The article proposes one of the possible options for constructing such sensors. The sensor is a two-component spherical dual-type element. Twelve biangular spherical conductive electrodes are placed in isolation on the spherical conductive surface of the sensor. The electrodes serve to form the sensitive elements of four dual sensors: two on each coordinate axis. Moreover, the dimensions of the sensor sensitive elements affect its error caused by the inhomogeneity of the field. The dual spherical sensor has a variable error: not exceeding $\pm 1,1\%$ in the $0 \leq a \leq 1$ entire spatial range, which corresponds to the $d = R$ minimum distance to the field source. The error of the sensor is provided by reasonably selected angular dimensions of twelve bi-angular spherical electrodes of the $\alpha_0 = 90^\circ$ and $\beta_{01} = 30^\circ$ sensor basic. The sensor has three outputs on each coordinate axis, two corresponding to single sensors and one to a dual sensor. This type allows expanding the sensor's functional features.

The dual spherical sensor is used for control and measurement means of electric field parameters of industrial frequency in high-intensity zones.

Keywords: electric field, field strength, dual spherical sensor, double spherical sensor, sensitive element, spherical biconvex, field inhomogeneity error.

References

1. Dez Zh., Pirrot P. Raschet i izmereniye napryazhennosti elektricheskogo polya vblizi ustroystv vysokogo napryazheniya [Calculation and measurement of electric field strength in the vicinity of high voltage devices]. / Ed. by Yu. P. Shkarina. *Vliyaniye Elektroustanovok Vysokogo Napryazheniya na Okruzhayushchuyu Sredu*. Moscow, 1979. P. 10–19. (In Russ.).
2. Chauzy S., Magnes P. Mise au point d'un mesureur de champ électrique alternatif 50 Hz [Development of the 50 Hz alternating electric field meter]. *Rev. gen. elec.* 1988. No. 7. P. 27–38. (In Fr.).
3. Pribor dlya izmereniya elektricheskogo polya INEP-50 [INEP-50 electric field measuring device]. URL: http://www.tecnoshans2006.ru/Documents/ACS/pass_INAP.DOC (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
4. Misakyan M., Kotter F. R., Kaler R. L. Miniaturnyy datchik elektricheskogo polya [Miniature electric field sensor]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. The Review of Scientific Instruments*. 1978. No. 7. P. 52–55. (In Russ.).
5. Shchiglovskiy K. B., Aksel'rod V. S. Pribory dlya izmereniya parametrov elektrostaticheskogo polya i ikh kalibrovka [Electrostatic field measurement devices and their calibration]. *Izmeritel'naya Tekhnika. Measurement Techniques*. 1978. No. 5. P. 63–65. (In Russ.).
6. Biryukov S. V., Lozhnikov V. Ya. Tsifrovoy izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty [Digital meter of electric field strength of industrial frequency]. *Pribory i tekhnika eksperimenta. Instruments and Experimental Techniques*. 1981. No. 1. P. 275. (In Russ.).
7. Biryukov S. V., Kats R. A., Lozhnikov V. Ya. [et al.]. Raschet i izmereniye napryazhennosti elektricheskogo polya v elektroustanovkakh sverkh- i ul'travysokogo napryazheniya [Calculation and measurement of electric field strength in ultra-high and ultra-high voltage electrical systems]. *Vliyaniye Elektroustanovok Vysokogo Napryazheniya na Okruzhayushchuyu Sredu*. Moscow, 1988. P. 6–13. (In Russ.).
8. Izmeritel' blizhnego elektromagnitnogo polya ELON [ELON near electromagnetic field meter]. URL: https://ppxp.ru/rub/html/pribori/pkosi0t/5_09 (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
9. Izmeritel' napryazhennosti INEP-8 [INEP-8 intensity meter]. URL: <http://granat-e.ru/inep-8.html> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
10. Izmeritel' napryazhennosti elektricheskogo i magnitnogo poley promyshlennoy chastoty PZ-50 [PZ-50 industrial frequency electric and magnetic field strength meter]. URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/17638-19-p3-50> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
11. Izmeritel' peremennogo elektricheskogo polya IEP-04 [IEP-04 alternating electric field meter]. URL: <https://www.ccenter.msk.ru/cat/1832/izmeritel-elektricheskogo-polya-iep-04-izmerenie-napryazhennosti> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
12. Izmeritel' napryazhennosti EP promyshlennoy chastoty GRADAN [GRADAN industrial frequency EMF intensity meter]. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/izmeritel_napryazhennosti_elektricheskogo_polya_promyshlennoy_chastoti_gradan_ot_kompanii_elektroenergetika.html (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
13. Indikator parametrov EMP promyshlennoy chastoty RADEKS EMI 50 [RADEKS EMI 50 industrial frequency EMI parameter indicator]. URL: http://www.izotop.ru/test/Instruktsiya_EMI50.pdf. (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).
14. Field Analyzer System EFA-3. URL: https://elektrotanya.com/files/e_efa3.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Engl.).
15. Izmeritel' elektricheskogo polya promyshlennoy chastoty BE-50 [BE-50 industrial frequency electric field meter].

URL: <https://ntm.ru/products/44/7261> (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

16. Izmeritel' parametrov elektricheskogo i magnitnogo poley VE-metr [BE-meter electric and magnetic field meter]. URL: https://priborysgk.ru/upload/shop_3/2/0/9/item_209/shop_property_file_209_189.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

17. Portativnyy analizator elektromagnitnogo polya EFA-300 [EFA-300 portable electromagnetic field analyser]. URL: http://alfa-test.ru/public/catalog/files/1291_efa-300_at_ru.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

18. Izotropnyy izmeritel' elektromagnitnogo polya P3-60 [P3-60 isotropic electromagnetic field meter]. URL: https://ciklon-pribor.ru/pdf/p3-60_pasp.pdf (accessed: 10.12.2024). (In Russ.).

19. Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. Metod izmereniya napryazhennosti neodnorodnykh elektricheskikh poley po srednemu znacheniyu [Method for measuring intensity of inhomogeneous electrical fields by average value]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 4 (178). P. 67–74. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-67-74. EDN: VISFYM. (In Russ.).

20. Biryukov S. V., Tyukina L. V. Modernizirovannyi metod izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya po srednemu znacheniyu sdvoyennymi datchikami i ustroystva dlya ego realizatsii [An upgraded method for measuring the electric field strength by the average value of dual sensors and devices for its implementation]. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2021. Vol. 9, no. 3. P. 64–72. DOI: 10.25206/2310-9793-9-3-64-72. EDN: QDVMDJ. (In Russ.).

21. Biryukov S. V., Shilikov A. S. Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya s elektrodami v forme sfericheskikh mnogougol'nikov [Sensor of electric field strength with spherical polygon electrodes]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2002. Issue 18. P. 123–127. (In Russ.).

22. Wilhelmy L. Sonde zur potenzialfreien Messung der periodischen und transienten elektrischen Feldstärke. *Elektrotechnische Zeitschrift*. 1973. A Bd. 94. Nu. 8. S. 441–445. (In Germ.).

23. Miroyubov N. N., Kostenko M. V., Levinshteyn M. L. [et al.]. Metody rascheta elektrostatoicheskikh poley [Calculation methods of electrostatic fields]. Moscow, 1963. 415 p. (In Russ.).

24. Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. Sdvoyennyye sfericheskiye datchiki napryazhennosti nizkochastotnykh

elektricheskikh poley novogo pokoleniya [Dual spherical intensity sensors for new generation low-frequency electric fields]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 62–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-62-67. EDN: AVJDSB. (In Russ.).

25. Biryukov S. V., Tyukina L. V., Tyukin A. V. Sdvoyennyy sfericheskiy datchik napryazhennosti elektricheskogo polya [Dual spherical electric field voltage sensor] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2021. Vol. 17, no. 5. P. 85–91. DOI: 10.36622/VSTU.2021.15.5.012. EDN: DZPPSE. (In Russ.).

26. Kaidanov F. G., Kats R. A., Biryukov S. V., Lozhnikov V. Ya. Calculation and measurement of fields on EHV and UHV substations and near transmission lines // CIGRE-86. International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Report 36-06, Session 27th August-4th September. Paris. 1986. 5 p. (In Engl.).

27. Kolmogorova S. S., Biryukov S. V. Proyektirovaniye elektroinduktsionnykh datchikov i sredstv izmereniy elektricheskikh poley [Designing of electroinduction sensors and electric field measuring devices]. Saint Petersburg, 2022. 180 p. ISBN 978-5-00125-731-8. DOI: 10.25990/7bky-3e46. EDN: DXISMN. (In Russ.).

BIRYUKOV Sergey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Physics Department, Omsk State Technical University, Omsk. SPIN-code: 9384-0078
ORCID: 0000-0002-1362-9911
AuthorID (SCOPUS): 7006438919
Correspondence address: sbiryukov154@mail.ru

For citations

Biryukov S. V. Two-component spherical dual-type electric field strength sensor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 1 (193). P. 98–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-98-106. EDN: JXPOUZ.

Received December 17, 2024.

© S. V. Biryukov

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