

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

# ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

# 2025

№ 2 (194)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,  
ФОТОНИКА,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ  
И СВЯЗЬ



# ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.  
Выходит 4 раза в год

№ 2 (194) 2025

## УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

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

Страница журнала на сайте учредителя:  
[http://www.omgту.ru/  
general\\_information/media.omgту/  
journal\\_of\\_omsk\\_research\\_journal/](http://www.omgту.ru/general_information/media.omgту/journal_of_omsk_research_journal/)

Подписной индекс  
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь  
М. Ф. Федорчук

Редактор  
Т. П. Семина

Компьютерная верстка  
О. Н. Чирун

Макет обложки  
В. С. Гуринов

© Редакция журнала  
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 16.06.2025 г.  
Дата выхода в свет 25.06.2025 г.

Формат 60x84 1/8.  
13,25 усл. печ. л.  
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе  
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.  
(1-й завод 1–100). Заказ 39  
Цена свободная

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.  
Published 4 times a year

**№ 2 (194) 2025**

### FOUNDER

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

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

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

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

Journal Page on Founder's Website:  
[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/)

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 16.06.2025  
Date of Publication 25.06.2025

Format 60x84 1/8.  
Conventional  
Printed Sheets 13,25  
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.  
(The 1st Printing Factory 1–100).  
Order 39  
Open Price

## EDITORIAL STAFF

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

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>Д. И. Чернявский.</b> Исследование упругопластических деформаций при статическом и динамическом взаимодействии двух твердых деформируемых тел. Индентор имеет коническую головную часть	5
<b>В. В. Грязнов, В. А. Коновалов, Д. А. Кормаков, И. В. Маркечко, Е. Н. Меркушев.</b> Штамповка поковок с боковыми отростками типа тройников в разъемном инструменте	18
<b>О. В. Кривошеев, С. В. Маврин, А. С. Старкова.</b> Сопряжение кривых Безье для задач гладкого соединения кривых и скругления углов	26
<b>В. Ю. Соломин, Л. О. Штриплинг, Вит. Ю. Соломин.</b> Методика расчета фракционного содержания пыли после очистки в пылеуловителях циклонного типа и ее доочистка	35
<b>Н. В. Бобков, А. А. Федоров, Н. С. Артеменко.</b> Моделирование процесса проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки методом конечных элементов	41
<b>К. С. Леон, К. И. Порсев.</b> Анализ современного состояния в области управления качеством конструкторско-технологической подготовки цифровых производств	49
<b>М. Н. Митягина, С. В. Мурашова.</b> Стратегическое картирование итеративного развития технологий на основе модульного анализа показателей качества модификаций	55

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<b>В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин.</b> Оптимизация ротора магнитоэлектрической синхронной машины с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса	64
<b>И. В. Ярошенко, В. В. Носенко, М. С. Алтунина, Ю. П. Аксенов.</b> Информативность online мониторинга параметров технического состояния турбогенераторов в сопоставлении с результатами визуального контроля	72
<b>В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, В. А. Деев, В. М. Троценко, В. Н. Горюнов, М. Ю. Николаев.</b> Исследование влияния окружающей среды на пропускную способность воздушных линий электропередачи	82
<b>Е. А. Темников, К. И. Никитин.</b> Применение искусственных нейронных сетей для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения	89

## ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<b>М. Н. Максимов, С. М. Максимова.</b> Полунатурное моделирование систем с использованием многополюсного фильтра	96
<b>А. А. Егорова, Л. Г. Варепо.</b> Анализ оборудования для испытаний радиопроизводки на устойчивость к воздействию внешних факторов	107

## ЮБИЛЕЙ

ВИКТОРУ ИЛЬИЧУ ПОТАПОВУ — 90 ЛЕТ	113
----------------------------------	-----

# CONTENTS

---

## MECHANICAL ENGINEERING

<b>D. I. Chernyavsky.</b> Study of elastoplastic deformations during static and dynamic interaction of two deformable solid bodies. Indenter with a conical tip	5
<b>V. V. Gryaznov, V. A. Konovalov, D. A. Kormakov, I. V. Markechko, E. N. Merkushev.</b> Stamping of forgings with side outlets of tee-type in a split tool	18
<b>O. V. Krivosheev, S. V. Mavrin, A. S. Starkova.</b> Bezier curve conjugation for smooth curve joining and corner rounding	26
<b>V. Yu. Solomin, L. O. Shtripling, Vit. Yu. Solomin.</b> Methodology for calculating the fractional content of dust after cleaning in cyclone-type dust collectors and its post-cleaning	35
<b>N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, N. S. Artemenko.</b> Modeling of the wire electrical discharge machining process using the finite element method	41
<b>K. S. Leon, K. I. Porsev.</b> Analysis of quality management in digital production design and technological preparation	49
<b>M. N. Mityagina, S. V. Murashova.</b> Strategic mapping of iterative technology development based on modular analysis of modification quality indicators	55

## ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

<b>V. V. Kharlamov, Yu. V. Moskalev, A. Yu. Milyutin.</b> Optimization of the rotor of a magnetoelectric synchronous machine with pole tips shaped as elliptical arcs	64
<b>I. V. Yaroshenko, V. V. Nosenko, M. S. Altunina, Yu. P. Aksenov.</b> Informative value of online monitoring of turbo generator technical condition parameters compared to visual inspection	72
<b>V. A. Krivolapov, S. S. Girshin, E. V. Petrova, V. A. Deev, V. M. Trotsenko, V. N. Goryunov, M. Yu. Nikolayev.</b> Investigation of the environmental impact on the capacity of overhead power lines	82
<b>E. A. Temnikov, K. I. Nikitin.</b> Application of artificial neural networks for saturation correction in current and voltage transformers	89

## ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

<b>M. N. Maksimov, S. M. Maksimova.</b> HIL modeling of systems using the multipole filter	96
<b>A. A. Egorova, L. G. Varepo.</b> Analysis of equipment for assessing radio product stability under external factors	107

## ANNIVERSARY

VIKTOR ILYICH POTAPOV IS 90	113
-----------------------------	-----

УДК/UDC 620.178.73  
DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-5-17  
EDN: JXBIZZ  
Научная статья / Original article

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДВУХ ТВЕРДЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ. ИНДЕНТОР ИМЕЕТ КОНИЧЕСКУЮ ГОЛОВНУЮ ЧАСТЬ

Д. И. Чернявский

Омский государственный технический университет, г. Омск

В работе проводится анализ динамических и статических зависимостей между силой и глубиной внедрения конических инденторов в преграды. Индентором является цилиндр с заостренной конической частью. Инденторы и преграды изготовлены из стали, дюралюминия и латуни. В результате оцифровки графиков исследуемых зависимостей получены интерполяционные формулы распределения энергий упругих и пластических деформаций в контактной зоне. Полученные результаты можно использовать при проектировании штампов и матриц для обработки материалов давлением, а также при разработке параметров технологических операций при изготовлении профильных деталей из стального и дюралюминиевого листового материала.

**Ключевые слова:** упругие и пластические деформации, цилиндрический индентор с конической головной частью, обработка материалов давлением, прочность, листовая штамповка, бесформенная многоточечная формовка.

**Для цитирования:** Чернявский Д. И. Исследование упругопластических деформаций при статическом и динамическом взаимодействии двух твердых деформируемых тел. Индентор имеет коническую головную часть // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 5–17. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-5-17. EDN: JXBIZZ.



© Чернявский Д. И., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## STUDY OF ELASTOPLASTIC DEFORMATIONS DURING STATIC AND DYNAMIC INTERACTION OF TWO DEFORMABLE SOLID BODIES. INDENTER WITH A CONICAL TIP

D. I. Chernyavsky

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The work analyzes the dynamic and static relationships between force and indentation depth when conical indenters are pressed into various materials. The indenter consists of a cylindrical body with a pointed conical tip. Indenters and targets are fabricated from steel, duralumin, and brass. Through digitization of graphs representing the investigated relationships, interpolation formulas describing the distribution of elastic and plastic deformation energies within the contact zone are derived. The obtained results can be applied in the design of dies and matrices for material forming processes, as well as in the determination of parameters for technological operations during the fabrication of profiled parts from steel and duralumin sheets.

**Keywords:** elastic and plastic deformations, cylindrical indenter with conical head part, processing of materials by pressure, strength, sheet stamping, formless multipoint forming.



© Chernyavsky D. I., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Введение

Соударение двух тел часто встречается в практической деятельности человека. Это могут быть технологические операции, связанные с обработкой материалов давлением; разрушение породы с целью добычи полезных ископаемых; применение удара в строительстве или в военном деле; а также и другие случаи. Удар отличается от статического состояния тем, что в точке контакта тел в течение очень короткого времени формируются и затем исчезают значительные силы, которые в итоге действуют на всю механическую систему двух тел. В результате данного процесса в телах формируются ударные волны. В зоне контакта одно тело внедряется в поверхность другого тела, в результате чего в поверхности этого тела возникает ударный кратер за счет пластической деформации материала тел.

Среди значительного количества исследований, посвященных различным аспектам изучения динамического и статического взаимодействия двух твердых деформируемых тел, в первую очередь необходимо выделить следующие классические публикации. Johnson K. L. [1] рассматривает контактную прочность материалов при их давлении друг на друга в статических и динамических условиях. Goldsmith W. [2], Stronge W. J. [3], Александров Е. В. и др. [4], Popov V. L. [5], Meyers M. [6] изучают основные разделы теории удара: центральный удар твердых деформируемых тел; удар твердых деформируемых тел в плоскости и в пространстве; численное моделирование ударного процесса, удар тел переменной жесткости, а также и другие теории.

В данной работе рассматривается ударное и статическое взаимодействие двух тел. Удар осуществляется при средних скоростях, т.е. при скоростях соударения тел величиной до 100 м/с. Данный диапазон скоростей удара широко применяется в различных технологических целях, т.к. при этом значительная часть первоначальной кинетической энергии затрачивается на формирование пластических деформаций только в зоне контакта тел. При этом уровень возникающих напряжений в теле не разрушает их и практически не изменяет форму данных тел. Также исследования показали, что удар при таком диапазоне скоростей столкновения тел позволяет считать ударные процессы изотермическими, поэтому термодинамические процессы можно не учитывать.

Статическое давление тел друг на друга осуществлялось под действием сил, соизмеримых с возникающими в зоне контакта ударными силами. Для проведения статической части опытов использовался кузнечный пресс.

В области теории ударных процессов хорошо изучен случай удара твердых деформируемых тел с поверхностями контакта различной кривизны второго порядка. Такие поверхности описываются гладкими дифференцируемыми функциями, и решения соответствующих дифференциальных уравнений определены в исследованиях Герца Г. [7], Ти-

мошенко С. П. [8], Беляева Н. М. [9], Ишлинского А. Ю. [10] и других авторов. В работах [11], [12] анализируются экспериментальные результаты соотношений между ударной силой и глубиной внедрения индентора (сферического шара) во второе тело. Тела изготавливались из различных сортов стали, алюминиевых сплавов и других материалов.

Менее изучена задача статического и динамического взаимодействия твердых деформируемых тел для случая применения конического индентора. В данном варианте применять теорию Герца нельзя, так как при внедрении конического индентора высота перемещения приповерхностных слоев второго тела (высота буртика кратера) соизмерима с размером вершины конуса внедренного в поверхность второго тела. Геометрическая контактная теория Герца предполагает малую глубину внедрения сферического индентора в полупространство по сравнению с размерами контактной области. Поэтому для изучения процесса внедрения конического индентора в преграду широко применяется численное моделирование.

Так, в работе [13] авторы решают задачи ударного взаимодействия конического индентора с цилиндрической оболочкой. Сравнение с результатами аналогичного воздействия на полупространство показало, что жесткость цилиндрической оболочки существенно влияет на зависимость контактной силы в течение времени удара. В диссертации [14] Dubey R. определяет оптимальную форму носовой части цилиндрических инденторов, ударно взаимодействующих с плоскими пластинами из алюминиевого сплава. Особенность данных пластин состоит в том, что их получают с помощью прокатки из плит, предварительно охлажденных до криогенных температур. В работе Vackman M. и др. [15] изучают удар стального закаленного шара о композитные пластины. Vorvik T. и др. в публикации [16] рассматривают прямой и косой удар цилиндрического индентора об алюминиевые пластины. В [17] Forrestal M. и др. изучают удар цилиндрических инденторов с коническими носовыми частями, а также с носовыми концами в виде ожевала об алюминиевые пластины.

Таким образом, можно отметить, что теоретическое и экспериментальное изучение проблем динамического и статического контактных взаимодействий является важным направлением дальнейшего развития машиностроения. Обозначения физических величин, принятых в данной статье, приведены в табл. 1.

### Постановка задачи

Рассмотрим экспериментальные данные, приведенные Tang W. в работе [18], посвященной ударному взаимодействию конических инденторов с различными геометрическими параметрами и скоростями. На рис. 1 приведена фотография общего вида экспериментальной установки для определения параметров удара; на рис. 2 показана принци-

Таблица 1. Обозначения в формулах  
Table 1. Formula notations

Символы	Описание	Размерность
$F$	Контактная сила	Н
$2\beta$	Угол заострения конической головной части индентора	градус
$h$	Длина индентора	мм
$a$	Величина сближения контактирующих тел	мм
$V$	Начальная скорость удара	м/с
$F_{\max}$	Максимальная сила удара	Н
$A$	Энергия удара индентора	Дж
$A_y$	Энергия упругих деформаций	Дж
$A_n$	Энергия пластических деформаций	Дж
${}_n\gamma$	Величина доли энергии упругих деформаций в зоне контакта индентора и преграды	–
${}_n\eta$	Величина доли энергии пластических деформаций в зоне контакта индентора и преграды	–

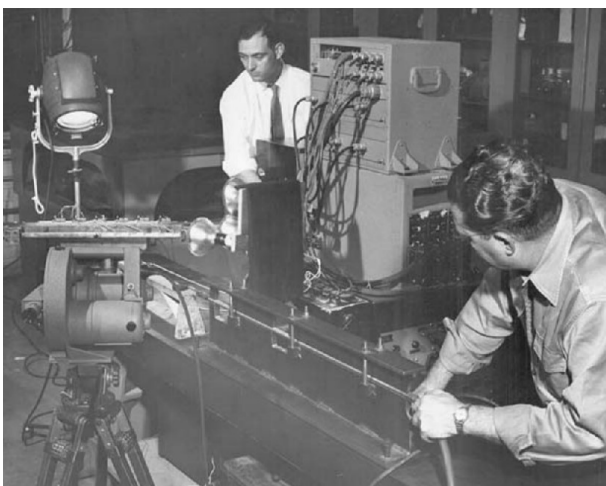


Рис. 1. Общий вид установки для проведения экспериментов по удару конических инденторов по плоским концам цилиндрических стержней [18]

Fig. 1. General view of the installation for conducting experiments on the impact of conical indenters on the flat ends of cylindrical rods [18]

пильная схема данной экспериментальной установки.

Экспериментальная установка работает следующим образом. На прочном основании 1 установлена пневматическая пушка 2, способная разогнать индентор 3 (рис. 2) до скорости 115 м/с. Индентор 3 попадает в наковальню 4, передавая свою кинетическую энергию наковальне и далее массивному маятнику 5. Для настройки ударной системы маятник 5 можно передвигать по высоте вверх или вниз благодаря механизму подвеса 6. В результате удара массивный маятник поднимается в свое верхнее положение и далее совершает затухающие механические колебания вокруг точки подвеса 6. Резиновый амортизатор 7 препятствует колебаниям маятника и вскоре останавливает маятник. На заднем торце маятника точно по оси симметрии наковальни размещен измерительный блок акселерометров 8, подсоединенный к запоминающему осциллографу. Два лазерных датчика 9 при проведении эксперимента испускают лазерные лучи. По мере движения ин-

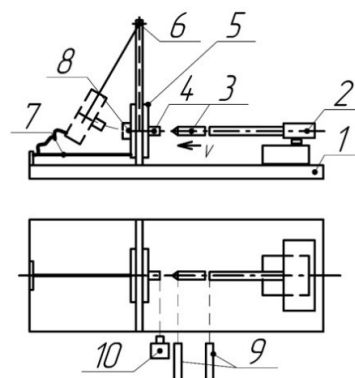


Рис. 2. Схема экспериментальной установки [18]: 1 — основание, 2 — пневматическая пушка, 3 — индентор, 4 — сменная наковальня (второе тело), 5 — массивный маятник, 6 — регулируемая по высоте подвеска маятника, 7 — демпфер (резиновый жгут), 8 — блок акселерометров, 9 — лазерные датчики, 10 — сверхскоростная кинокамера [18]

Fig. 2. Scheme of the experimental installation [18]: 1 — base; 2 — pneumatic gun; 3 — indenter; 4 — replaceable anvil (second body); 5 — massive pendulum; 6 — height-adjustable pendulum suspension; 7 — damper (rubber harness); 8 — accelerometer unit; 9 — laser sensors; 10 — ultrafast camera [18]

дентора в ходе опыта головная часть индентора пересекает лазерный луч ближайшего к обрезу ствола пушки лазерного датчика. При прерывании лазерного луча фотодатчик (на рисунке не показан) формирует управляющий сигнал для включения сверхскоростной кинокамеры 10, установленной точно в плоскости ударного торца наковальни 4. По разности времени прерывания лазерных лучей первого и второго лазерных датчиков 9 вычисляется скорость индентора во время текущего опыта. Вариан-

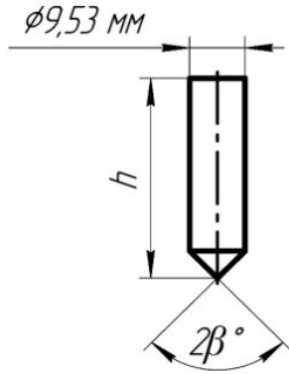


Рис. 3. Геометрические характеристики индентора.

$h = 37$  мм для  $\beta = 10^\circ$ ;

$h = 25$  мм для  $\beta = 30^\circ$ ;

$h = 21$  мм для  $\beta = 60^\circ$

Fig. 3. Geometrical features of the indenter:

$h = 37$  mm for  $\beta = 10^\circ$ ;

$h = 25$  mm for  $\beta = 30^\circ$ ;

$h = 21$  mm for  $\beta = 60^\circ$

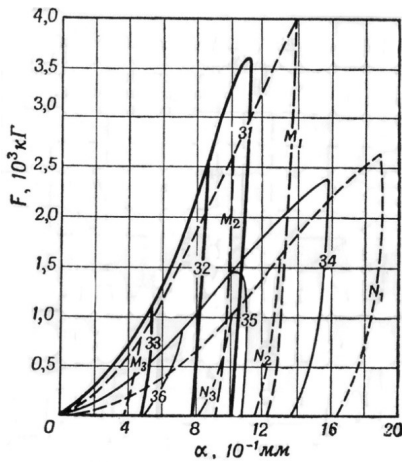


Рис. 4. Динамические и статические зависимости сила — глубина внедрения для случая удара конических цилиндрических инденторов по торцам цилиндрических стержней. Диаметр стержней 9,53 мм.

Угол при вершине —  $2\beta = 120^\circ$

Материалы индентора и преграды одинаковые [18]

Fig. 4. Dynamic and static force — depth of penetration dependences in case of tapered cylindrical indenters striking the ends of cylindrical rods. The diameter of the rods is 9.53 mm.

The angle at the apex —  $2\beta = 120^\circ$

The materials of the indenter and the barrier are the same [18]

ты исполнения конструкции индентора представлены на рис. 3.

На рис. 4–9 представлены экспериментальные диаграммы зависимостей сила — глубина внедрения при ударе и статическом контакте индентора о преграды, изготовленные из различных металлов. Результаты динамических и статических испытаний представлены в табл. 2, 3 [18].

Для решения практических задач при обработке металлов давлением часто целесообразно использовать энергетический метод. Например, для компонен-

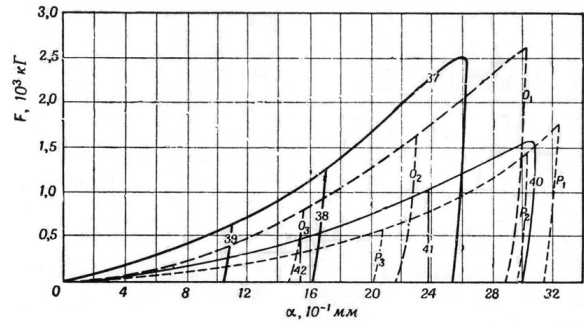


Рис. 5. Динамические и статические зависимости сила — глубина внедрения для случая удара конических цилиндрических инденторов по торцам цилиндрических стержней. Диаметр стержней 9,53 мм.

Угол при вершине —  $2\beta = 60^\circ$ .

Материалы индентора и преграды одинаковые [18]

Fig. 5. Dynamic and static force — depth of penetration dependences in case of conical cylindrical indenters striking the ends of cylindrical rods. The diameter of the rods is 9.53 mm. The angle at the apex —  $2\beta = 60^\circ$ .

The materials of the indenter and the barrier are the same [18]

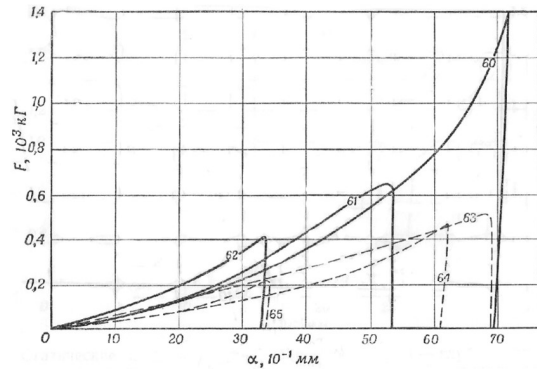


Рис. 6. Динамические и статические зависимости сила — глубина внедрения для случая удара конических цилиндрических инденторов по торцам цилиндрических стержней. Диаметр стержней 9,53 мм.

Угол при вершине —  $2\beta = 20^\circ$ .

Материалы индентора и преграды одинаковые [18]

Fig. 6. Dynamic and static force — depth of penetration dependences in case of conical cylindrical indenters striking the ends of cylindrical rods. The diameter of the rods is 9.53 mm. The angle at the apex —  $2\beta = 20^\circ$ .

The materials of the indenter and the barrier are the same [18]

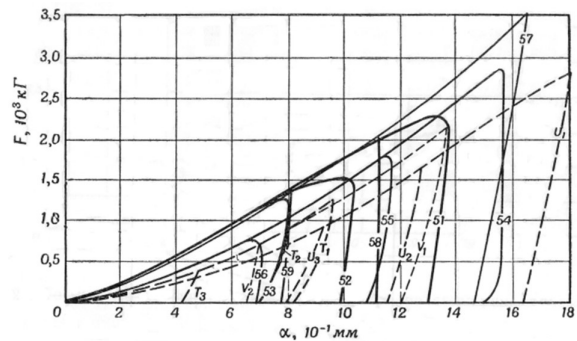


Рис. 7. Динамические и статические зависимости сила — глубина внедрения для случая удара конических цилиндрических инденторов по торцам цилиндрических стержней. Диаметр стержней 9,53 мм.

Угол при вершине —  $2\beta = 120^\circ$ .

Материалы индентора и преграды различные [18]

Fig. 7. Dynamic and static force — depth of penetration dependences in case of conical cylindrical indenters striking the ends of cylindrical rods. The diameter of the rods is 9.53 mm. The angle at the apex —  $2\beta = 120^\circ$ .

The materials of the indenter and the barrier are the same [18]

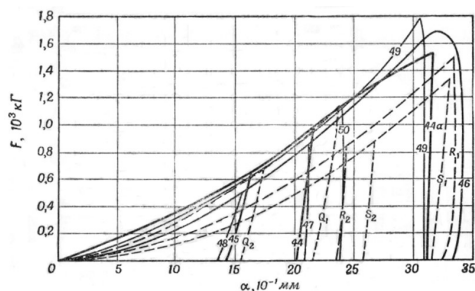


Рис. 8. Динамические и статические зависимости сила — глубина внедрения для случая удара конических цилиндрических инденторов по торцам цилиндрических стержней. Диаметр стержней 9,53 мм. Угол при вершине —  $2\beta = 60^\circ$ .

Материалы индентора и преграды различные [18]  
 Fig. 8. Dynamic and static force — depth of penetration dependences in case of conical cylindrical indenters striking the ends of cylindrical rods. The diameter of the rods is 9.53 mm. The angle at the apex —  $2\beta = 60^\circ$ .  
 The materials of the indenter and the barrier are the same [18]

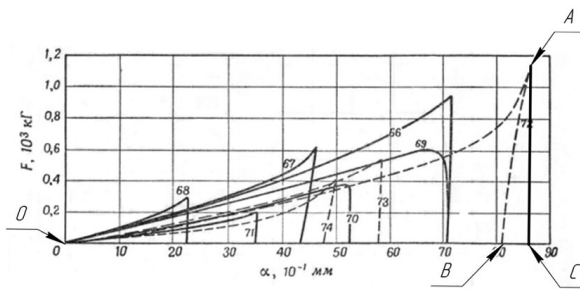


Рис. 9. Динамические и статические зависимости сила — глубина внедрения для случая удара конических цилиндрических инденторов по торцам цилиндрических стержней. Диаметр стержней 9,53 мм. Угол при вершине —  $2\beta = 20^\circ$ .

Материалы индентора и преграды различные [18]  
 Fig. 9. Dynamic and static force — depth of penetration dependences in case of conical cylindrical indenters striking the ends of cylindrical rods. The diameter of the rods is 9.53 mm. The angle at the apex —  $2\beta = 20^\circ$ .  
 The materials of the indenter and the barrier are the same [18]

Таблица 2. Исходные данные, рисунки 4, 5, 6  
 Table 2. Initial data, Fig. 4, 5, 6

Номер опыта, динамика	Начальная скорость удара $V$ , м/с	Номер опыта, статика	Материал индентора	Материал преграды
31	57,4	$M_1$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,7; масса индентора — 10,8 г; $2\beta = 120^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,7
32	38,8	$M_2$		
33	20,4	$M_3$		
34	97,0	$N_1$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 80; масса индентора — 3,8 г; $2\beta = 120^\circ$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 80
35	63,0	$N_2$		
36	33,8	$N_3$		
37	74,0	$O_1$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,5; масса индентора — 10,8 г; $2\beta = 60^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,5
38	46,0	$O_2$		
39	22,5	$O_3$		
40	114,0	$P_1$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 80; масса индентора — 3,8 г; $2\beta = 60^\circ$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 75,5
41	74,5	$P_2$		
42	45,0	$P_3$		
60	84,0	—	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,6; масса индентора — 10,8 г; $2\beta = 20^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,6
61	54,9	—		
62	38,6	—		
63	105,0	—	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 80; масса индентора — 3,8 г; $2\beta = 20^\circ$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 80
64	82,0	—		
65	44,2	—		

сации эффекта пружинения при операциях гибки металлических заготовок необходимо знать соотношение между упругими и пластическими деформациями в зоне гибки [19–20]. Используем данные, приведенные на рис. 4–9, для расчета соотношения энергий данных деформаций на основе принципа сохранения энергии.

С помощью системы трехмерного проектирования КОМПАС-3D была проведена оцифровка графиков, приведенных на рис. 4–9. Рассмотрим пример такой оцифровки графиков на примере рис. 9 (опыт 72).

Исходные данные для этого опыта приведены в табл. 3. Ось  $\alpha$ , показывающая величину сближения контактирующих тел, была разделена на отдельные отрезки, равные по величине 0,002 дюйма или 0,05 мм. Для каждого из этих значений  $\alpha$  опре-

делялась соответствующая величина действующей контактной силы  $F$  на оси абсцисс. В итоге были сформированы две матрицы с численными значениями сближения  $\alpha$  и контактной силы  $F$ . Далее строился отдельный график, описывающий дискретные значения зависимости  $F(\alpha)$ .

На рис. 9 видно, что график № 72 состоит из двух кривых — линии OA и линии AB. Кривая OA графически изображает функцию сжатия материалов индентора и преграды в зоне контакта; а линия AB характеризует функцию восстановления упругих параметров этих материалов в данной контактной зоне. Далее с помощью известных математических методов подбирались две интерполяционные функции для описания дискретных значений кривых OA и AB, удовлетворяющих математическим условиям интерполяции. Кривая OA описыва-

Таблица 3. Исходные данные, рисунки 7, 8, 9  
Table 3. Initial data, Fig. 7, 8, 9

Номер опыта, динамика	Начальная скорость удара $V$ , м/с	Номер опыта, статика	Материал индентора	Материал преграды
51	63,4	$T_1$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 17,0; масса индентора — 10,8 г; $2\beta = 120^\circ$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 82,0
52	40,8	$T_2$		
53	34,6	$T_3$		
54	89,3	$U_1$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 65,8; масса индентора — 3,8 г; $2\beta = 120^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 17,3
55	60,8	$U_2$		
56	30,4	$U_3$		
57	61,4	$V_1$	Латунь С26800 (Л68) — HB = 78,4; масса индентора — 11,6 г; $2\beta = 120^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 16,0
58	41,3	$V_2$		
59	27,2	—		
43	73,0	$Q_1$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,0; масса индентора — 10,8 г; $2\beta = 60^\circ$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 82
44	46,4	$Q_2$		
45	32,2	—		
46	108,0	$R_1$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 83,5; масса индентора — 3,8 г; $2\beta = 60^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 17,3
47	67,6	$R_2$		
48	38,0	—		
49	63,4	$S_1$	Латунь С26800 (Л68) — HB = 76; масса индентора — 11,6 г; $2\beta = 60^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 17,0
50	43,4	$S_2$		
66	84,6	—	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 13,5; масса индентора — 10,8 г; $2\beta = 20^\circ$	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 84,0
67	55,3	—		
68	24,5	—		
69	108,5	—	Дуралюмин 2024-T4 — HB = 65,7; масса индентора — 3,8 г; $2\beta = 20^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 17,0
70	77,9	—		
71	44,6	—		
72	76,4	—	Латунь С26800 (Л68) — HB = 79,0; масса индентора — 11,6 г; $2\beta = 20^\circ$	Отожженная инструментальная сталь — HRC = 17,0
73	56,6	—		
74	36,4	—		

ется выражением (1), и для кривой АВ интерполировано уравнение (2).

$$F_{OA} = 1,216 \cdot 10^9 \delta^{2,483} + 728,971, \quad (1)$$

$$F_{AB} = 5,362 \cdot 10^6 \delta^{0,039} - 4,453 \cdot 10^6. \quad (2)$$

Для определения работы, затраченной на сжатие материалов индентора и преграды в контактной зоне, необходимо определить площадь треугольника ОАС (рис. 9). Величина данной работы численно равна сумме энергий формирования упругих и пластических деформаций в зоне контакта. Соответственно, площадь треугольника АВС (рис. 9) численно равна работе, совершаемой упругими деформациями соударяющихся тел после окончания удара. Аналогичный расчетный прием используется при исследовании диаграмм, описывающих статическое контактное взаимодействие тел.

Для определения работы, совершаемой пластическими деформациями в контактной зоне, необходимо рассчитать разность площадей криволинейных треугольников ОАС и АВС. Для большего удобства вместо термина «работа» применим термин «Энергия формирования упругих деформаций —  $A_y$ » и «Энергия формирования пластических деформаций —  $A_n$ ».

Для проведения дальнейших расчетов запишем выражения (1) и (2) в общем виде:

$$F_{OA} = a_1 \delta^{a_2} + a_3, \quad (3)$$

$$F_{AB} = b_1 \delta^{b_2} + b_3. \quad (4)$$

Проинтегрируем выражения (3) и (4)

$$\begin{aligned} A_y + A_n &= \int_0^{\delta_A} F_{OA} d\delta = \int_0^{\delta_A} (a_1 \delta^{a_2} + a_3) d\delta = \\ &= \frac{a_1}{(a_2 + 1)} \delta_A^{(a_2+1)} + a_3 \delta_A, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_y &= \int_{\delta_B}^{\delta_A} F_{AB} d\delta = \frac{b_1}{(b_2 + 1)} \delta_A^{(b_2+1)} + \\ &+ b_3 \delta_A - \frac{b_1}{(b_2 + 1)} \delta_B^{(b_2+1)} - b_3 \delta_B. \end{aligned} \quad (6)$$

Соответственно, энергия  $A_n$  будет определяться следующим выражением:

$$A_n = (A_y + A_n) - A_y. \quad (7)$$

Таблица 4. Силовые и энергетические характеристики взаимодействия индентора из отожжённой инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с наковальней из различных материалов  
 Table 4. Force and energy features of the interaction of the indenter made of annealed tool steel with a head part in the cone form with different angles at the apex with an anvil of different materials

Номер опыта	Энергия удара индентора — $A$ , Дж	Максимальная сила — $F_{max}$ , Н	Остаточное сближение — $a$ , мм	Энергия упругих деформаций — $A_y$ , Дж	Энергия пласт. деформаций — $A_n$ , Дж	Доля энергии упругих деформаций $n_y = \frac{A_y}{A_y + A_n}$	Доля энергии пластических деформаций $n_n = \frac{A_n}{A_y + A_n}$
Взаимодействие — сталь по стали, $2\beta = 120^\circ$							
31	17,792	34774	0,947	1,282	13,442	0,095	0,905
32	8,129	24491	0,719	1,030	6,883	0,150	0,850
33	2,247	11244	0,451	0,428	1,812	0,191	0,809
$M_1$	—	39124	1,211	1,958	19,176	0,093	0,907
$M_2$	—	26089	0,916	2,496	11,501	0,217	0,783
$M_3$	—	7473	0,373	0,403	1,407	0,286	0,714
Взаимодействие — сталь по стали, $2\beta = 60^\circ$							
37	29,570	26312	2,523	1,113	26,408	0,037	0,963
38	8,129	12905	1,620	0,507	7,608	0,062	0,938
39	2,473	6580	1,044	0,218	2,222	0,089	0,911
$O_1$	—	26869	2,882	1,257	28,408	0,042	0,958
$O_2$	—	16694	2,153	0,767	12,714	0,057	0,943
$O_3$	—	6505	1,037	0,121	1,678	0,067	0,933
Взаимодействие — сталь по стали, $2\beta = 20^\circ$							
60	38,102	13729	6,874	2,072	26,092	0,038	0,962
61	16,276	6654	5,155	0,651	12,531	0,053	0,947
62	8,046	4127	3,196	0,373	5,293	0,066	0,959
Взаимодействие — сталь по дуралюмину, $2\beta = 120^\circ$							
51	21,706	23263	1,203	0,642	14,887	0,041	0,896
52	8,989	15308	0,993	0,467	7,526	0,058	0,942
53	6,465	12498	0,700	0,419	4,427	0,086	0,914
$T_1$	—	11879	0,817	0,488	3,419	0,125	0,875
$T_2$	—	8029	0,685	0,455	2,068	0,180	0,820
$T_3$	—	3191	0,420	0,137	0,525	0,207	0,793
Взаимодействие — сталь по дуралюмину, $2\beta = 60^\circ$							
43	38,102	14340	3,110	0,393	19,969	0,019	0,981
44	16,276	9172	2,016	0,648	7,835	0,076	0,924
45	8,046	6070	1,442	0,544	4,050	0,118	0,882
$Q_1$	—	10694	2,156	1,055	8,406	0,112	0,888
$Q_2$	—	6359	1,542	0,556	3,588	0,134	0,866
Взаимодействие — сталь по дуралюмину, $2\beta = 20^\circ$							
66	38,649	9272	7,073	0,282	27,505	0,010	0,990
67	16,514	6177	4,332	0,819	10,554	0,072	0,928
68	3,241	2897	2,254	0,244	2,564	0,087	0,913

При практическом применении более удобно оперировать относительными величинами энергии деформаций.

$$n_y = \frac{A_y}{A_y + A_n}; n_n = \frac{A_n}{A_y + A_n} \quad (8)$$

$$n_y + n_n = 1. \quad (9)$$

Полученные величины энергии приведены в табл. 4, 5 и 6. В табл. 7 показаны полученные

функциональные зависимости силы  $F$  от скорости удара  $V$ , а также функции относительных величин энергии упругих деформаций  $n_y$  от скорости удара и ударной (статической) силы. Величины  $n_n$  легко определить из выражений (7–9). На рис. 10 и 11 приведены примеры графического описания полученных интерполяционных кривых, приведенных в табл. 7.

Интерполяционные выражения, приведенные в табл. 7, позволяют определить соотношения между величинами сближения и силы, возникающими в области контактной зоны взаимодействия инден-

Таблица 5. Силовые и энергетические характеристики взаимодействия индентора из дуралюмина с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с наковальней из различных материалов

Table 5. Force and energy features of the interaction of the duralumin indenter with a head part in the cone form with different angles at the apex with an anvil of different materials

Номер опыта	Энергия удара индентора — $A$ , Дж	Максимальная сила — $F_{max}$ , Н	Остаточное сближение — $\alpha$ , мм	Энергия упругих деформаций — $A_y$ , Дж	Энергия пласт. деформаций — $A_n$ , Дж	Доля энергии упругих деформаций $n_y = \frac{A_y}{A_y + A_n}$	Доля энергии пластических деформаций $n_n = \frac{A_n}{A_y + A_n}$
Взаимодействие — дуралюмин по дуралюмину, $2\beta = 120^\circ$							
34	17,877	23115	1,297	1,352	13,299	0,092	0,908
35	7,541	15980	0,986	0,801	5,454	0,128	0,872
36	2,171	8329	0,471	0,462	1,631	0,221	0,779
$N_1$	—	25508	1,541	1,803	15,790	0,102	0,898
$N_2$	—	15707	1,083	0,970	5,334	0,154	0,846
$N_3$	—	10100	0,777	0,783	2,407	0,245	0,755
Взаимодействие — дуралюмин по дуралюмину, $2\beta = 60^\circ$							
40	24,692	16571	2,988	0,706	18,229	0,037	0,963
41	10,545	10600	2,297	0,364	8,905	0,044	0,956
42	3,848	5036	1,498	0,161	2,965	0,052	0,948
$P_1$	—	17984	3,138	0,668	16,462	0,039	0,961
$P_2$	—	14738	2,931	0,591	13,101	0,043	0,957
$P_3$	—	6103	2,002	0,213	4,320	0,047	0,953
Взаимодействие — дуралюмин по дуралюмину, $2\beta = 20^\circ$							
63	22,162	5093	6,848	0,116	15,911	0,007	0,993
64	12,776	4533	6,093	0,194	9,601	0,020	0,980
65	3,712	2265	3,373	0,085	2,443	0,034	0,966
Взаимодействие — дуралюмин по стали, $2\beta = 120^\circ$							
54	15,152	28183	1,489	1,042	13,414	0,072	0,928
55	7,024	17622	1,069	0,678	6,512	0,104	0,896
56	1,756	7726	0,678	0,259	1,405	0,156	0,844
$U_1$	—	26979	1,632	1,830	16,680	0,079	0,921
$U_2$	—	15890	1,062	0,777	6,720	0,104	0,896
$U_3$	—	8373	0,801	0,465	2,719	0,146	0,854
Взаимодействие — дуралюмин по стали, $2\beta = 60^\circ$							
46	22,162	15777	3,313	1,009	19,652	0,049	0,951
47	8,683	8055	2,015	0,674	5,504	0,109	0,981
48	2,744	4725	1,365	0,479	2,208	0,178	0,822
$R_1$	—	13981	3,238	0,344	16,239	0,021	0,979
$R_2$	—	7917	2,354	0,460	6,372	0,067	0,933
Взаимодействие — дуралюмин по стали, $2\beta = 20^\circ$							
69	22,367	6677	7,047	0,405	20,216	0,020	0,980
70	11,530	3850	5,238	0,183	8,695	0,022	0,978
71	3,779	1961	3,494	0,072	2,905	0,024	0,976

тора и преграды. Задаваясь требуемыми значениями ударной скорости или ударной силы в пределах указанных диапазонов изменения скорости удара или силы можно оценить численные величины доли энергии как упругих  $n_y$ , так и пластических деформаций  $n_n$  в контактной зоне.

Коэффициент детерминации  $R^2$  показывает степень достоверности результатов интерполяционной формулы к имеющимся значениям экспериментальных данных.

Для наиболее достоверного случая коэффициент детерминации равен 1.

### Результаты теоретических исследований

При обработке металлов давлением известен физический процесс, который носит название «эффект пружинения». Углом пружинения при изгибе листовой заготовки или профилей называется угол  $\alpha$ , на который разгибается согнутый при прессовании до заданного угла  $\beta$  лист металла за счет его упругих свойств после снятия нагрузки. Используем вышеприведенные соотношения величин энергий упругих и пластических деформаций материала заготовки для расчета компенсации «эффекта пружинения».

Таблица 6. Силовые и энергетические характеристики взаимодействия индентора из латуни с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с наковальней из отожжённой инструментальной стали  
 Table 6. Force and energy features of the interaction of the brass indenter with a head part in the cone form with different angles at the apex with an anvil of annealed tool steel

Номер опыта	Энергия удара индентора — $A$ , Дж	Максимальная сила — $F_{max}$ , Н	Остаточное сближение — $a$ , мм	Энергия упругих деформаций — $A_y$ , Дж	Энергия пласт. деформаций — $A_n$ , Дж	Доля энергии упругих деформаций $n_y = \frac{A_y}{A_y + A_n}$	Доля энергии пластических деформаций $n_n = \frac{A_n}{A_y + A_n}$
Взаимодействие — латунь по стали, $2\beta = 120^\circ$							
57	21,866	33873	1,457	3,014	17,525	0,147	0,853
58	9,893	20113	1,098	1,196	8,296	0,126	0,874
59	4,291	13112	0,752	0,472	4,087	0,104	0,896
$V_1$	—	20838	1,202	1,288	8,960	0,126	0,874
$V_2$	—	6632	0,650	0,135	1,597	0,078	0,922
Взаимодействие — латунь по стали, $2\beta = 60^\circ$							
49	23,313	16755	3,085	0,365	19,293	0,019	0,981
50	10,925	10473	2,385	0,109	9,986	0,011	0,989
$S_1$	—	12467	3,167	0,846	12,883	0,062	0,938
$S_2$	—	8255	2,574	0,382	6,915	0,052	0,948
Взаимодействие — латунь по стали, $2\beta = 20^\circ$							
72	33,854	11106	8,080	3,427	25,489	0,119	0,881
73	18,581	5286	5,765	1,409	12,456	0,102	0,898
74	7,685	4120	4,767	0,520	5,350	0,089	0,911

Таблица 7. Интерполяционные функции для расчета силы и относительной величины энергии упругих деформаций в зоне контакта конического индентора и наковальни при ударе и статическом нагружении  
 Table 7. Interpolation functions for calculating the force and relative energy value of elastic deformations in the contact zone of the conical indenter and anvil at impact and static loading

Вид интерполяционной функции		Диапазоны изменения скорости удара $V$ (м/с) и силы $F$ (Н)	Коэффициент детерминации $R^2$
Взаимодействие — сталь по стали, $2\beta = 120^\circ$			
Динамика	$F = -357,023 + 613,353V + 0,11V^2$	20,4 ≤ V ≤ 57,4	0,999
	$n_y = 0,223 - 1 \cdot 10^{-3}V - 1,772 \cdot 10^{-5}V^2$		0,998
	$n_y = 0,212 - 1,172 \cdot 10^{-6}F - 6,410 \cdot 10^{-11}F^2$	$1 \cdot 10^4 \leq F \leq 4 \cdot 10^4$	0,990
Статика	$n_y = 0,290 + 3,157 \cdot 10^{-7}F - 1,384 \cdot 10^{-10}F^2$	$7 \cdot 10^3 \leq F \leq 4 \cdot 10^4$	0,961
Взаимодействие — сталь по стали, $2\beta = 60^\circ$			
Динамика	$F = 275,15 + 203,001V + 1,974V^2$	22,5 ≤ V ≤ 74,0	0,997
	$n_y = 0,12 - 2 \cdot 10^{-3}V + 5,798 \cdot 10^{-6}V^2$		0,999
	$n_y = 0,122 - 5,806 \cdot 10^{-6}F + 9,892 \cdot 10^{-11}F^2$	$5 \cdot 10^3 \leq F \leq 3 \cdot 10^4$	0,995
Статика	$n_y = 0,072 - 5,914 \cdot 10^{-7}F - 1,936 \cdot 10^{-11}F^2$	$5 \cdot 10^3 \leq F \leq 3 \cdot 10^4$	0,996
Взаимодействие — сталь по стали, $2\beta = 20^\circ$			
Динамика	$F = 17,68 + 52,57V + 1,321V^2$	38,6 ≤ V ≤ 84,0	0,999
	$n_y = 0,103 - 1 \cdot 10^{-3}V + 4,215 \cdot 10^{-6}V^2$		0,996
	$n_y = 0,087 - 6,045 \cdot 10^{-6}F + 1,823 \cdot 10^{-10}F^2$	$4 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,4 \cdot 10^4$	0,986
Взаимодействие — сталь по дуралюмину, $2\beta = 120^\circ$			
Динамика	$F = -50,819 + 372,528V - 0,057V^2$	33,0 ≤ V ≤ 65,0	0,998
	$n_y = 0,131 - 3 \cdot 10^{-3}V + 1,782 \cdot 10^{-5}V^2$		0,997
	$n_y = 0,273 - 2,13 \cdot 10^{-5}F + 4,898 \cdot 10^{-10}F^2$	$1 \cdot 10^4 \leq F \leq 2,5 \cdot 10^4$	0,966
Статика	$n_y = 0,203 + 4,182 \cdot 10^{-6}F - 9,157 \cdot 10^{-10}F^2$	$3 \cdot 10^3 \leq F \leq 12 \cdot 10^3$	0,987
Взаимодействие — сталь по дуралюмину, $2\beta = 60^\circ$			
Динамика	$F = -38,825 + 191,867V + 0,081V^2$	31,0 ≤ V ≤ 72,0	0,998
	$n_y = 0,291 - 7 \cdot 10^{-3}V + 3,833 \cdot 10^{-5}V^2$		0,992
	$n_y = 0,262 - 2,801 \cdot 10^{-5}F + 7,603 \cdot 10^{-10}F^2$	$6 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,5 \cdot 10^4$	0,983
Статика	$n_y = 0,145 + 1,22 \cdot 10^{-7}F - 3,047 \cdot 10^{-10}F^2$	$6 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,1 \cdot 10^4$	0,997

Продолжение табл. 7  
Continuation of the Table 7.

Вид интерполяционной функции		Диапазоны изменения скорости удара $V$ (м/с) и силы $F$ (Н)	Коэффициент детерминации $R^2$
Взаимодействие — сталь по дуралюмину, $2\beta = 20^\circ$			
Динамика	$F = -124,275 + 80,612V + 0,413V^2$	$37,0 \leq V \leq 85,0$	0,983
	$n_y = 0,087 + 8,27 \cdot 10^{-4}V - 2,081 \cdot 10^{-5}V^2$		0,996
	$n_y = 0,080 + 7,722 \cdot 10^{-6}F - 1,693 \cdot 10^{-9}F^2$	$3 \cdot 10^3 \leq F \leq 1 \cdot 10^4$	0,983
Взаимодействие — дуралюмин по дуралюмину, $2\beta = 120^\circ$			
Динамика	$F = -113,226 + 268,077V - 0,283V^2$	$33,8 \leq V \leq 97,0$	0,999
	$n_y = 0,384 - 6 \cdot 10^{-3}V + 2,854 \cdot 10^{-5}V^2$		0,994
	$n_y = 0,374 - 2,162 \cdot 10^{-5}F + 4,091 \cdot 10^{-10}F^2$	$8 \cdot 10^3 \leq F \leq 2,6 \cdot 10^4$	0,996
Статика	$n_y = 0,485 - 3,007 \cdot 10^{-5}F + 5,938 \cdot 10^{-10}F^2$	$1 \cdot 10^4 \leq F \leq 2,6 \cdot 10^4$	0,991
Взаимодействие — дуралюмин по дуралюмину, $2\beta = 60^\circ$			
Динамика	$F = -159,131 + 115,978V + 0,291V^2$	$45,0 \leq V \leq 114,0$	0,996
	$n_y = 0,069 - 4,251 \cdot 10^{-4}V + 2,297 \cdot 10^{-6}V^2$		0,999
	$n_y = 0,061 - 1,841 \cdot 10^{-6}F + 2,428 \cdot 10^{-11}F^2$	$5 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,7 \cdot 10^4$	0,997
Статика	$n_y = 0,046 + 3,677 \cdot 10^{-7}F - 4,191 \cdot 10^{-11}F^2$	$6 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,8 \cdot 10^4$	0,996
Взаимодействие — дуралюмин по дуралюмину, $2\beta = 20^\circ$			
Динамика	$F = -40,66 + 61,998V - 0,121V^2$	$43,0 \leq V \leq 107,0$	0,992
	$n_y = 0,043 - 1,392 \cdot 10^{-4}V - 1,875 \cdot 10^{-6}V^2$		0,991
	$n_y = 0,048 - 5,223 \cdot 10^{-6}F + 7,853 \cdot 10^{-11}F^2$	$2 \cdot 10^3 \leq F \leq 5,5 \cdot 10^3$	0,997
Взаимодействие — дуралюмин по стали, $2\beta = 120^\circ$			
Динамика	$F = -68,833 + 234,668V + 0,926V^2$	$30,0 \leq V \leq 90,0$	0,999
	$n_y = 0,226 - 3 \cdot 10^{-3}V + 9,894 \cdot 10^{-6}V^2$		0,999
	$n_y = 0,21 - 7,784 \cdot 10^{-6}F + 1,037 \cdot 10^{-10}F^2$	$7 \cdot 10^3 \leq F \leq 2,9 \cdot 10^4$	0,998
Статика	$n_y = 0,209 - 8,952 \cdot 10^{-6}F + 1,54 \cdot 10^{-10}F^2$	$8 \cdot 10^3 \leq F \leq 2,8 \cdot 10^4$	0,997
Взаимодействие — дуралюмин по стали, $2\beta = 60^\circ$			
Динамика	$F = 124,781 + 91,963V + 0,481V^2$	$38,0 \leq V \leq 108,0$	0,997
	$n_y = 0,301 - 4 \cdot 10^{-3}V + 1,272 \cdot 10^{-5}V^2$		0,999
	$n_y = 0,299 - 3,064 \cdot 10^{-5}F + 9,466 \cdot 10^{-10}F^2$	$4 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,7 \cdot 10^4$	0,994
Статика	$n_y = 0,234 - 2,886 \cdot 10^{-5}F + 9,784 \cdot 10^{-10}F^2$	$7 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,5 \cdot 10^4$	0,998
Взаимодействие — дуралюмин по стали, $2\beta = 20^\circ$			
Динамика	$F = 36,094 + 27,127V + 0,310V^2$	$43,0 \leq V \leq 110,0$	0,998
	$n_y = 0,026 - 5,159 \cdot 10^{-5}V - 7,186 \cdot 10^{-8}V^2$		0,999
	$n_y = 0,026 - 1,369 \cdot 10^{-6}F + 6,103 \cdot 10^{-11}F^2$	$1,5 \cdot 10^3 \leq F \leq 7 \cdot 10^3$	0,999
Взаимодействие — латунь по стали, $2\beta = 120^\circ$			
Динамика	$F = 56,463 + 396,574V + 2,474V^2$	$26,0 \leq V \leq 63,0$	0,998
	$n_y = 0,201 - 2 \cdot 10^{-3}V - 1,114 \cdot 10^{-5}V^2$		0,999
	$n_y = 0,198 - 4,682 \cdot 10^{-6}F + 5,631 \cdot 10^{-11}F^2$	$1,2 \cdot 10^4 \leq F \leq 4 \cdot 10^4$	0,998
Статика	$n_y = 0,150 - 3,680 \cdot 10^{-6}F + 1,095 \cdot 10^{-11}F^2$	$6 \cdot 10^3 \leq F \leq 2,2 \cdot 10^4$	0,999
Взаимодействие — латунь по стали, $2\beta = 60^\circ$			
Динамика	$F = -12,832 + 194,857V + 1,110V^2$	$42,0 \leq V \leq 65,0$	0,999
	$n_y = -0,006 + 4 \cdot 10^{-4}V - 1,030 \cdot 10^{-7}V^2$		0,996
	$n_y = -0,002 + 1,290 \cdot 10^{-6}F - 5,902 \cdot 10^{-13}F^2$	$1,0 \cdot 10^4 \leq F \leq 1,9 \cdot 10^4$	0,991
Статика	$n_y = 0,029 + 3,129 \cdot 10^{-6}F - 3,661 \cdot 10^{-11}F^2$	$7 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,3 \cdot 10^4$	0,992
Взаимодействие — латунь по стали, $2\beta = 20^\circ$			
Динамика	$F = 182,761 + 35,035V + 1,323V^2$	$42,0 \leq V \leq 65,0$	0,983
	$n_y = 0,074 + 2,383 \cdot 10^{-4}V + 4,623 \cdot 10^{-6}V^2$		0,999
	$n_y = 0,052 + 1,144 \cdot 10^{-5}F - 4,92 \cdot 10^{-10}F^2$	$4,0 \cdot 10^3 \leq F \leq 1,2 \cdot 10^4$	0,985

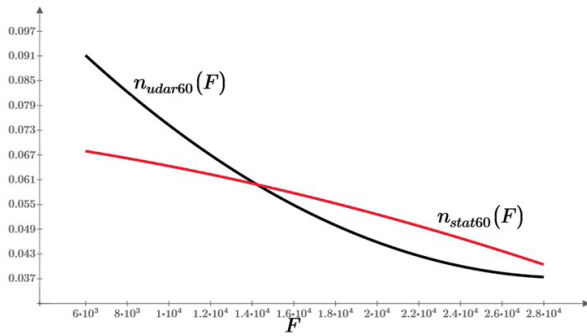


Рис. 10. Пример построения интерполяционных кривых на основе данных табл. 7. Взаимодействие сталь по стали. Угол заострения конуса индентора — 60°.  $n_{udar60}(F)$  — график ударного взаимодействия;  $n_{stat60}(F)$  — график статического взаимодействия  
 Fig. 10. Example of interpolation curves based on Table 7 data. Steel-on-steel interaction. The angle of sharpening of the indenter cone is 60°.  $n_{udar60}(F)$  — impact interaction graph;  $n_{stat60}(F)$  — static interaction graph

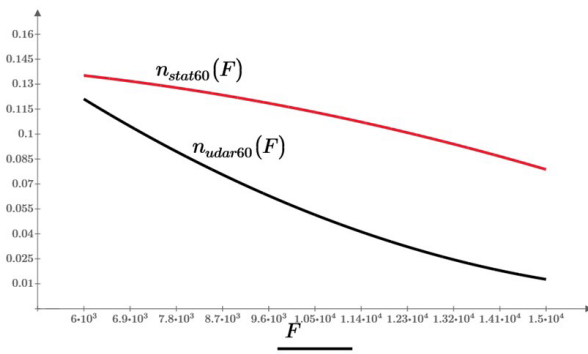


Рис. 11. Пример построения интерполяционных кривых на основе данных таблицы 7. Взаимодействие сталь по дуралюмину. Угол заострения конуса индентора — 60°.  $n_{udar60}(F)$  — график ударного взаимодействия;  $n_{stat60}(F)$  — график статического взаимодействия  
 Fig. 11. Example of interpolation curves based on the Table 7 data. Steel on duralumin interaction. The angle of sharpening of the indenter cone is 60°.  $n_{udar60}(F)$  — impact interaction graph;  $n_{stat60}(F)$  — static interaction graph

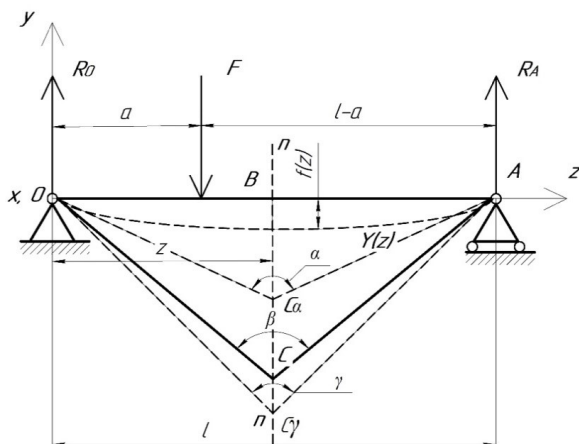


Рис. 12. Расчетная схема изгиба листовой заготовки OA на основе примера расчета изгиба двухопорной статически определимой балки  
 Fig. 12. Calculation scheme of OA sheet bending based on the example of bending calculation of a two-supported statically determinate beam

Расчетная схема изгиба листовой заготовки приведена на рис. 12. Отрезок OA обозначает начальное положение листа заготовки. Линия ОС<sub>α</sub> показывает заданное конечное положение готовой детали. Линия ОС<sub>α</sub> показывает фактическое конечное положение готовой детали вследствие эффекта пружинения. На основании материалов справочника [21] запишем уравнение поперечного изгиба  $Y(z)$  и максимального прогиба  $f(z)$  нейтральной линии заготовки OA. Для условия  $0 \leq z \leq a$  при  $0 \leq a \leq 0,5l$  получим уравнение:

$$Y(z) = -\frac{Fa^2(l-a)^2}{6E_2J_2l} \left[ 2\frac{z}{a} + \frac{z}{l-a} - \frac{z^3}{a^2(l-a)} \right]. \quad (10)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  получим:

$$Y(z) = -\frac{Fa^2(l-a)^2}{6E_2J_xl} \left[ 2\frac{l-z}{l-a} + \frac{l-z}{a} - \frac{(l-z)^3}{a(l-a)^2} \right]. \quad (11)$$

Значение максимального прогиба  $f(z)$  вычисляется уравнением:

$$f(z) = -\frac{F(l-a)l^2\sqrt{3}}{27E_2J_x} \sqrt{\left(1 - \frac{(l-a)^2}{l^2}\right)^3},$$

при  $z = \sqrt{\frac{l^2 - (l-a)^2}{3}}. \quad (12)$

Тогда работа необходимая для изгиба заготовки на величину  $f(z)$  равна

$$A = Ff(z) = -\frac{F^2(l-a)l^2\sqrt{3}}{27E_2J_x} \sqrt{\left(1 - \frac{(l-a)^2}{l^2}\right)^3},$$

при  $z = \sqrt{\frac{l^2 - (l-a)^2}{3}}. \quad (13)$

Примем допущение, что вся энергия формоизменения заготовки OA расходуется только на формирование упругих и пластических деформаций в плоскости изгиба листа  $n-n$ , т.е. в точке С. Заметим, что на рис. 6 приведена проекция заготовки в плоскости YZ. В действительности в точке С расположена линия изгиба листа OA, и эта линия направлена вдоль оси X, т.е. в глубину рис. 12.

Как видно из рис. 12, для компенсации эффекта пружинения необходимо изогнуть лист OA до линии ОС<sub>α</sub>, чтобы далее заготовка вернулась на линию ОС<sub>α</sub>, которая показывает заданное конечное положение готовой детали. Иными словами, для компенсации эффекта пружинения необходимо затратить дополнительную энергию  $\Delta A$ . Запишем выражение с учетом уравнений (8) и (9).

$$\frac{A_y + \Delta A_y}{A + \Delta A} + \frac{A_n + \Delta A_n}{A + \Delta A} = 1. \quad (14)$$

Основным условием выражения (14) является то, что энергия дополнительных пластических деформаций должна полностью компенсировать энергию упругих деформаций, которые вызывают эффект пружинения.

$$\Delta A_n = A_y = An_y, \quad (15)$$

$$\frac{A_y + \Delta A_y}{A + \Delta A} + \frac{A_n + An_y}{A + \Delta A} = 1. \quad (16)$$

Примем допущение, что при малом увеличении силы, а соответственно, и малом увеличении общей энергии деформации соотношение между энергиями упругих и пластических деформаций остается неизменным. Тогда получим следующие выражения.

$$\frac{A_n + An_y}{A + \Delta A} = n_n, \quad \frac{A_n}{A} = n_n, \quad (17)$$

$$\frac{An_n + An_y}{A + \Delta A} = n_n, \quad (18)$$

$$\Delta A = A \frac{n_y}{n_n} = A \frac{(1 - n_n)}{n_n}, \quad (19)$$

$$A + \Delta A = A \left[ 1 + \frac{(1 - n_n)}{n_n} \right]. \quad (20)$$

С учетом выражения (13) можно записать:

$$A = F_A f(z) \text{ и } A + \Delta A = F_{A+\Delta A} f(z). \quad (21)$$

Раскрыв функцию  $f(z)$  и решая выражения (21), совместно получим:

$$F_{A+\Delta A}^2 = F^2 \left[ 1 + \frac{(1 - n_n)}{n_n} \right], \quad (22)$$

$$F_{A+\Delta A} = F \frac{1}{\sqrt{n_n}}. \quad (23)$$

Таким образом, используя данные, приведенные в табл. 4–7, можно рассчитать режимы компенсации эффекта сужения.

### Выводы и заключение

При анализе полученных данных, представленных на рис. 4–12 и в табл. 4–7, можно сделать следующие выводы.

1. Получено цифровое описание экспериментальных графиков [18], которое позволяет определить соотношение между величинами упругих и пластических деформаций в контактной зоне конического индентора и наковальни при динамическом и статическом нагружении в зависимости от величины действующей силы.

2. Полученные данные необходимо использовать при проектировании штампов и матриц при обработке материалов давлением. Особенно это актуально при проведении технологических операций получения профильных деталей из стального и дюралюминиевого листового материала на основе применения бесформенной многоточечной формовки. Это современная гибкая технология обработки листовых заготовок и пластин, при которой штамп и матрица состоят из равномерно расположенного по площади листовой заготовки большого количества вертикально установленных стержней. За счет изменения высоты данных стержней в режиме реального времени создается дискретная трехмерная поликонтактная формообразующая поверхность для получения трехмерного листового изделия.

3. В дальнейшем предполагается проанализировать величины упругих и пластических деформаций в контактной зоне конического индентора и наковальни для случаев, когда вершины конических инденторов имеют закругления различного радиуса.

### Список источников / References

1. Johnson K. L. Contact mechanics. University of Cambridge, Cambridge University Press, 1985. 462 p. DOI: 10.1017/CBO9781139171731.
2. Goldsmith W. Impact: The theory and physical behavior of colliding solids. London: Arnold, 1960. 379 p.
3. Stronge W. J. Impact mechanics. University of Cambridge, Cambridge University Press, 2000. 300 p.
4. Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем: моногр. Москва: Наука, 1969. 201 с.  
Aleksandrov E. V., Sokolinskiy V. B. Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem [Applied theory and calculations of impact systems]. Moscow, 1969. 201 p. (In Russ.).
5. Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. Springer–Verlag, 2010. 362 p.
6. Meyers M. Dynamic Behavior of Materials. John Wiley & Sons, Inc, 1994. 688 p. ISBN 978-0-471-58262-5.
7. Herz H. Gesammelte Werke. Band 1. Schriften vermischten inhalts. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1895. S. 155.
8. Тимошенко С. П., Гуд'ер Дж. Теория упругости / пер. с англ. М. И. Рейтмана; под ред. Г. С. Шапиро. Москва: Наука, 1975. 576 с.  
Timoshenko S. P., Gud'yer Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity] / trans. from Engl. M. I. Reytman; ed. by G. S. Shapiro. Moscow, 1975, 576 p. (In Russ.).
9. Беляев Н. М. Сопrotivление материалов. Москва: Наука, 1976. 608 с.  
Belyayev N. M. Soprotivleniye materialov [Resistance of materials]. Moscow, 1976. 608 p. (In Russ.).
10. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. Москва: Физматлит, 2001. 704 с.  
Ishlinskiy A. Yu., Ivlev D. D. Matematicheskaya teoriya plastichnosti [Mathematical theory of plasticity]. Moscow, 2001. 704 p. (In Russ.).
11. Goldsmith W., Lyman P. The penetration of hard–steel spheres into plane metal surfaces. *Journal of Applied Mechanics*. 1960. Vol. 27. P. 717–725. DOI: 10.1115/1.3644088.
12. Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование динамических характеристик удара двух твердых деформируемых тел при скорости удара до 100 м/с // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. EDN: BBYOHG.
13. Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. Issledovaniye dinamicheskikh kharakteristik udara dvukh tverdykh deformiruyemykh tel pri skorosti udara do 100 m/s [Study of dynamic impact characteristics of two solid deformable bodies at impact speed up to 100 m/s]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. EDN: BBYOHG. (In Russ.).
14. Beskopylny A., Veremeenko A., Kadomtseva E., Shilov A. Dynamic response of a plate laying on elastic base during the impact of f conical indenter. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 196. 01001. DOI: 10.1051/mateconf/201819601001.
15. Dubey R. Ballistic impact response of thermo-mechanically processed Al alloy (6082): the Thesis. Indian Institute of Technology. Madras, 2023. 288 p.
16. Backman M., Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*. 1978. Vol. 16. P. 1–99. DOI: 10.1016/0020-7225(78)90002-2.
17. Borvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38 (7). P. 577–589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001.
18. Forrestal M., Warren T. Perforation equations for conical and ogival nose rigid projectiles into aluminum target plates. *International Journal of Impact Engineering*. 2009. Vol. 36 (2). P. 220–225. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.04.005.

18. Tang W. The Penetration of Conical Indenters with Hemispherical Tips into Plane Metal Surfaces: the Thesis (M.S.). University of California. Berkeley, 1962.

19. Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование упругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54. EDN: WSRGEE.

Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. Issledovaniye uprugoplasticheskogo izgiba listovoy zagotovki razlichnoy tolshchiny pri eye val'tsevanii [Study elastoplastic bending of a sheet blank of different thickness while rolling]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54. EDN: WSRGEE. (In Russ.).

20. Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование упругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее гибке с учетом эффекта пружинения // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14. EDN: VQZRG1.

Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. Issledovaniye uprugoplasticheskogo izgiba listovoy zagotovki razlichnoy tolshchiny pri eye gibke s uchetom effekta pruzhineniya [Study of elastoplastic bending of sheet blank of different thickness at its bending taking into account the springing effect]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 2 (190). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14. EDN: VQZRG1. (In Russ.).

21. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1988. 736 с.

Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of Strength of Materials]. 2nd ed. Kyiv, 1988. 736 p. (In Russ.).

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры

«Машиноведение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Адрес для переписки: maneg1@omgtu.ru

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

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 23.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

**CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Mechanical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 8610-2957

AuthorID (RCSI): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Correspondence address: maneg1@omgtu.ru

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

The article was submitted 31.01.2025; approved after reviewing 23.04.2025; accepted for publication 29.04.2025.

## ШТАМПОВКА ПОКОВОК С БОКОВЫМИ ОТРОСТКАМИ ТИПА ТРОЙНИКОВ В РАЗЪЕМНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

В. В. Грязнов, В. А. Коновалов,  
Д. А. Кормаков,  
И. В. Маркечко, Е. Н. Меркушев

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье рассматриваются варианты анализа конструкторско-технологических решений горячей объемной штамповки тройников в разъемных штампах на кривошипном горячештамповочном прессе двойного действия. Методика анализа основана на оценке параметров формоизменения при допустимых изменениях формы и размеров гравюры формообразующего инструмента и размеров заготовок. Используются современные методы исследований, сопровождаемые циклом проектирования технологии от задания начальных условий до создания 3D-модели штампованных поковок и изготовления инструмента. Разработанный алгоритм проектирования технологии позволяет добиться упрощения и ускорения процесса подготовки производства поковок. В заключение представлены факторы, определяющие возможности повышения качества штампуемых изделий, и предложены направления возможного совершенствования технологии штамповки поковок деталей с отрезками типа тройников.

**Ключевые слова:** горячая штамповка, пресс двойного действия, моделирование, формоизменение, тройник, поковка с отрезком, разъемные матрицы.

**Для цитирования:** Грязнов В. В., Коновалов В. А., Кормаков Д. А., Маркечко И. В., Меркушев Е. Н. Штамповка поковок с боковыми отрезками типа тройников в разъемном инструменте // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 18–25. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-18-25. EDN: FBĐTUN.



© Грязнов В. В., Коновалов В. А., Кормаков Д. А.,  
Маркечко И. В., Меркушев Е. Н., 2025.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## STAMPING OF FORGINGS WITH SIDE OUTLETS OF TEE-TYPE IN A SPLIT TOOL

V. V. Gryaznov, V. A. Konovalev,  
D. A. Kormakov,  
I. V. Markechko, E. N. Merkushev

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article considers the options for analyzing design and technological solutions for hot volume stamping of tees in split dies on a double-action crank hot stamping press. The analysis technique is based on assessing the parameters of shaping with acceptable changes in the shape and size of the shaping tool engraving and the dimensions of the blanks. Modern research methods are used, accompanied by a technology design cycle from setting the initial conditions to creating a 3D model of stamped forgings and manufacturing the tool. The developed algorithm for designing the technology allows for simplifying and accelerating the process of preparing for the production of forgings. In conclusion, the factors that determine the possibilities of improving the quality of stamped products are presented, and directions for possible improvement of the technology for stamping forgings of parts with tee-type processes are proposed.

**Keywords:** hot stamping, double-action press, modeling, shaping, tee, forging with a process, split dies.



В конструкциях трубопроводов различных агрегатов, устройств и машин, как правило, не обходятся без применения деталей, обеспечивающих разветвление этих трубопроводов. К таким деталям относятся различного рода тройники, позволяющие изменять направление потоков жидкости либо газа в трубопроводе. Известно несколько технологий получения штампованных заготовок для тройников. Наиболее часто применяемым вариантом для деталей из стали является горячая штамповка из штучной заготовки в инструменте объемного деформирования с одним разъемом. Если тройник сравнительно небольших габаритов, то применяют многоступенчатый метод (одна заготовка на несколько поковок).

При открытой схеме деформирования процесс сопровождается образованием технологического отхода — облоя. Причем чем меньше масса изделия, тем больше в заготовке доля такого отхода.

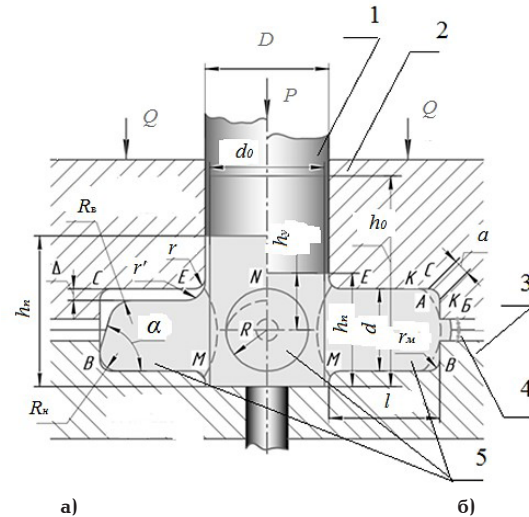
Безоблойная штамповка приемлема в случаях изготовления больших партий поковок тройников, когда экономия металла на отсутствии облоя оправдывает усложняющуюся в таких случаях конструкцию инструмента.

Основное требование — обеспечение приближения наружных контуров и размеров поковки к готовой детали может быть обеспечено увеличением числа поверхностей разъема штампа (не менее двух) либо применением механизмов замыкания разъемных частей штампового блока. Таких конструктивных решений для штампов, устанавливаемых на прессы одностороннего действия, разработано немало, однако однозначно надежным не одно из них признать нельзя. Значительные преимущества и устранение части названных проблем при реализации технологии штамповки в разъемном инструменте даёт использование кривошипных горячештамповочных прессов (КГШП) двойного действия.

Выбор технологических решений при проектировании инструмента для штамповки на этих прессах является также сложной задачей. Определяющие факторы: типоразмеры поковки, свойства штампуемого материала и инструмента, условия нагрева, смазка гравюры и прочее. В представленной работе предложены материалы экспериментальных исследований и моделирования процессов горячей штамповки тройников в разъемных штампах на КГШП двойного действия. Работа посвящена поиску конструкторско-технологических решений, снижающих риск или исключающих характерные дефекты штампованных тройников (зажимы, незаполненные элементы формы гравюры и другие). Целью работы является выявление факторов, определяющих возможности повышения качества штампуемых изделий.

### 1. Анализ публикаций по рассматриваемой теме

Чтобы понимать предстоящие проблемы исследования и определиться с конкретными его зада-



**Рис. 1.** Схема заполнения матрицы при штамповке поковки с отростками [3]: а — стадия истечения в боковую полость; б — стадия заполнения боковой полости. 1 — пуансон; 2 — полуматрица верхняя с приемником; 3 — полуматрица нижняя; 4 — компенсатор; 5 — полости под боковые отростки

**Fig. 1.** Scheme of matrix filling at stamping of forgings with tees [3]: a — stage of flow into the lateral cavity; b — stage of filling of the lateral cavity. 1 — punch; 2 — upper half-matrix with a receiver; 3 — lower half-matrix; 4 — compensator; 5 — cavities for lateral tees

чами, был произведен поиск и обзор публикаций по тематике «Процессы штамповки в разъемных матрицах поковок с боковыми отростками».

Известно, что при штамповке поковок, имеющих бурты и сплошные или полые отростки, расположенные под различными углами к оси поковки, рационально применять разъемные матрицы [1]. Последние в процессе деформирования должны быть плотно сжаты между собой, чтобы предотвратить вытекание металла в зазор.

При этом по условию удаления поковок из штампа могут иметь место два варианта технологического процесса штамповки в разъемных матрицах [2]: когда плоскость разъема матриц перпендикулярна направлению приложения деформирующего усилия и когда — параллельна.

Поковки крестовин и фланцев карданных валов, крестовин дифференциалов задних мостов автомобилей и тому подобные выдавливают в матрицы с разъемом, перпендикулярным вектору усилия деформации. Аналогично поступали при разработке процессов штамповки тройников авторы ниже приводимых публикаций, исследовавшие особенности формоизменения поковок с боковыми отростками.

В работе [3] установлено, что формоизменение деформируемой заготовки включает три стадии:

- осаживание заготовки в приемнике матрицы;
- истечение металла в боковые полости (стадия истечения) (рис. 1а);

— окончательное заполнение формы ручья и вытеснение избытка металла в компенсаторы (стадия заполнения) (рис. 1б).

Изначально заготовка размерами  $d_0 \times h_0$  осаживается, после чего начинается течение металла в боковые полости диаметром  $d$ .

Наличие вертикальной  $\sigma_v$  и горизонтальной  $\sigma_r$  составляющих напряженного состояния прижимает металл к нижней поверхности полости под отросток, вследствие чего частицы металла вблизи угла поворота  $E$  движутся по кривой радиусом  $r' > r$ . Между движущимся металлом и поверхностью ЕС образуется зазор  $\Delta$ , наличие которого означает неполное оформление поперечника отростка.

Выполненные эксперименты [1] выявили также, что из-за неравномерности скорости истечения металла при оформлении поперечного сечения отростка в начале стадии истечения форма его торца не является плоской — верхняя кромка скруглена неким радиусом  $R_v$ , плавно уменьшающимся в сторону нижней кромки, причем явно  $R_v > R_n$  (рис. 1а). Торце отростка вначале наклонен к оси полости матрицы под углом  $\alpha$ , но далее принимает более правильную форму, радиусы  $R_v$  и  $R_n$  становятся одинаковыми,  $\alpha$  стремится к  $90^\circ$ .

Стадия заполнения выглядит в виде трех этапов (рис. 1б):

- течение металла в направлении зазора  $\Delta$ , когда торцовая кромка заполняется неравномерно (угол  $C$  в меньшей степени заполнен, чем угол  $B$ );
- перемещение металла в углы полости компенсатора диаметром  $d_k$ . При этом фаска «а» оказывается постоянной по всей кромке отростка;
- затекание металла в компенсатор.

Исследования силового режима штамповки поковок с боковыми отростками [4] выявили три участка на графике усилие — путь, которые соответствуют:

- а) осадке заготовки приемной части матрицы;
- б) истечению в полости под отростки;
- в) окончанию оформления поковки и вытеканию металла в компенсатор.

Установлено влияние характера течения металла на усилие деформирования и усилие раскрытия матриц. Определение последнего важно для обеспечения потребной силы сжатия полуматриц.

Показано, что раскрытию матриц в стадии окончания оформления поковки способствует ряд факторов, связанных с формой и размерами поковки,

а также с конфигурацией полости матрицы [4].

Экспериментами установлено, что для поковок с цилиндрическими отростками наиболее выгодным относительным диаметром компенсатора  $d_k/d$  является значение из интервала  $0,35 \dots 0,40$ . Удельное усилие штамповки, определявшееся при  $1100^\circ\text{C}$ , составляло от 500 до 600 МПа, а давление раскрытия матриц от 300 до 350 МПа.

Отмечается также, что в определенный момент протекания стадии истечения (рис. 1а) в донной части нижней полуматрицы возникает очаг металла, не перемещающегося в продольном направлении, и возникает застойная зона.

При значительных смещениях металла на границе застойной зоны и пластического объема возникают зажимы, а продолжающееся до заполнения боковых полостей и компенсатора перемещение металла приводит к более глубокому проникновению зажима в тело поковки, что фактически превращает изделие в брак.

Характерным примером поковок, конфигурация которых обуславливает возникновение застойных зон в конечной стадии процесса, являются различного рода тройники.

Неоднократно показано [3, 1], что в случае равенства длин отростков у тройников заполнение полости ручья происходит равномерно на протяжении всего процесса деформирования. Если отростки не равной длины, то полость под отросток меньшей длины заполняется раньше другой полости и становится застойным элементом, в дальнейшем вырождающимся в зажим как правило в основании короткого отростка.

Для предотвращения возникновения этого вида дефекта в работе [5] предложено выполнять штамповку в два перехода.

Окончательно все вопросы по исключению вероятности образования зажимов у поковок сложной конфигурации может снять моделирование процесса при условиях конкретных форм и соотношений размеров поковок.

Исследователи процессов обработки металлов давлением используют методы моделирования, основанные на:

- теоретическом решении задач формоизменения изучаемого процесса, например, методом конечных элементов (МКЭ) [6–9] или методом верхней оценки [10];
- анализе с помощью известных программных

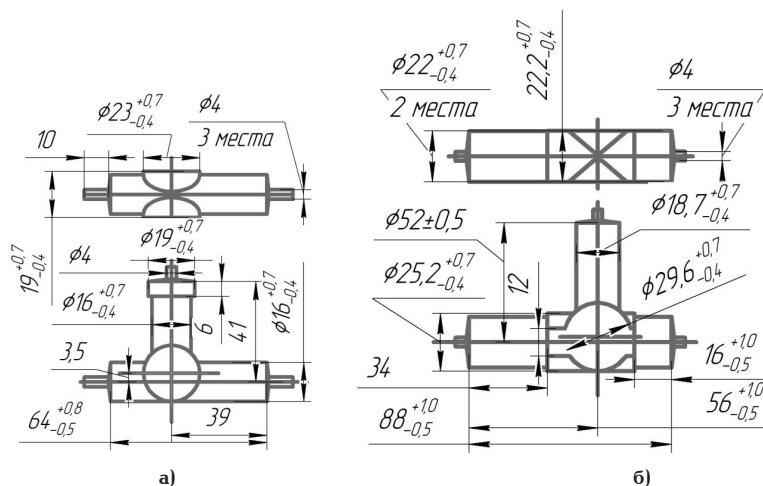


Рис. 2. Эскизы: а — «Тройник 122», б — «Тройник 35.06.090А»  
 Fig. 2. Sketches: а — “T-joint 122”; б — “T-joint 35.06.090A”

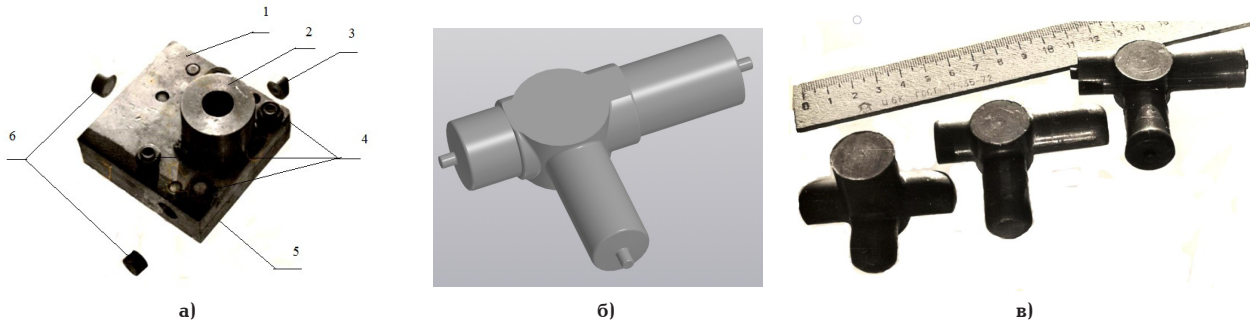


Рис. 3. Упрощенная оснастка для моделирования заполнения полостей ручья под «Тройник 122» на свинцовых заготовках (а), фотографии оформленного свинцового образца «Тройник 122» (б) и стадий его оформления (в): 1 — полуматрица верхняя; 2 — контейнер; 3 — заглушка полости под отросток с отверстием компенсатора; 4 — крепеж полуматриц; 5 — полуматрица нижняя; 6 — заглушки полостей под отростки

Fig. 3. Simplified tooling for modelling the filling of stream cavities for "T-joint 122" on lead blanks (a), photos of the "T-joint 122" lead sample (б) and stages of its design (в): 1 — upper half-matrix; 2 — container; 3 — plug of the cavity under the tee with the compensator hole; 4 — fixing of half-matrices; 5 — lower half-matrix; 6 — plugs of cavities for sprouts

продуктов (Deform-3D) [11–12], QForm и других; — физических экспериментах в совокупности с математическим анализом [6, 7].

## 2. Моделирование процесса штамповки поковки «Тройник 122»

Принятые к разработке технологии производства поволоков с боковыми отростками детали «Тройник 122» и «Тройник 35.06.090 А» (рис. 2) имеют близкие между собой размеры при неравной длине отростков на каждом из изделий, что, как указано выше, не гарантирует бездефектного оформления поволоков. Решили, что физические эксперименты по отработке технологии штамповки изделий данной группы будут проводиться на модели поковки детали «Тройник 122».

В результате анализа материалов публикаций предыдущих периодов [1–5], а также принимая во внимание конфигурацию и размеры изделия «Тройник 122», на первом этапе исследований были поставлены задачи:

1. Провести эксперименты по штамповке «Тройника 122», как характерного представителя данной группы изделий, на свинцовых заготовках, чтобы выявить возможные внешние дефекты в поковке при деформировании в разъемном инструменте.

2. Отштамповать поковки детали «Тройник 122» из стальных заготовок и провести анализ их макроструктуры на предмет наличия или отсутствия зажимов.

3. Представить рекомендации по совершенствованию технологии штамповки поволоков изделия «Тройник 122» в разъемных матрицах с учетом проведенного экспериментального деформирования.

По базовой технологии поковка «Тройника 122» изготавливалась на горячештамповочном прессе открытой штамповкой в многогнездовом штампе. При этом отход металла в облой достигал около 40 % от массы поковки и требовалась последующая калибровка.

Перевод на штамповку в разъемной матрице позволяет серьезно повысить коэффициент использования металла и снизить общую трудоемкость изготовления изделия путем исключения операции по удалению (обрезки) облоя, а также операции калибровки.

Для перевода «Тройника 122» на КГШП двойного действия были проведены некоторые конструктивные изменения отдельных элементов поковки

(рис. 2а).

Так, например, введены цилиндрические бобышки с двух сторон в центральной части «Тройника 122», которые неизбежно будут оформляться плоскими торцами цилиндрических пуансона и выталкивателя при выбранном горизонтальном разрезе матриц. Использование пуансона и выталкивателя с плоскими торцами обусловлено их большей стойкостью.

Процесс протекает в условиях близких к оптимальным при использовании заготовок с малым отношением высоты к диаметру. Максимальный диаметр, который можно вписать в контур поковки, располагается в плоскости осей отростков. При таком диаметре высота заготовки получается минимальной. Этим обосновывается выбор расположения плоскости разреза. Кроме этого, при принятом расположении ручья в полуматрицах первоначально идет равномерное заполнение полостей под отростки, что должно исключать образование зажимов.

Однако при последующем деформировании, когда металл заполнит полость малого отростка, но будет перемещаться в остальные две полости под отростки, возникает вероятность образования зажима.

С целью проверки наличия такого явления были проведены экспериментальные исследования формоизменения на свинцовых образцах с использованием упрощенной экспериментальной оснастки (рис. 3а).

Конструкция экспериментальной оснастки представляет собой две стянутые между собой болтами полуматрицы — верхнюю 1 и нижнюю 5, в плоскости разреза которых выполнены гравюры половин поковки в плане.

Размеры гравюр обеих половин соответствуют размерам «горячей» поковки «Тройник 122».

В торцах полостей под отростки предусмотрены отверстия компенсаторов, которые в процессе деформирования закрываются заглушками 3 и 6. Диаметры компенсаторов цилиндрической формы приняты равными 4 мм (соответствует минимальному значению  $d_k/d = 0,2$ , рекомендованному в [4]).

Исходная заготовка помещается в контейнер 2, одновременно служащий направляющим элементом пуансона (на рис. 3а не показан).

Свинцовые образцы изготавливали «в размер» профиля из отлитых заготовок выдавливанием

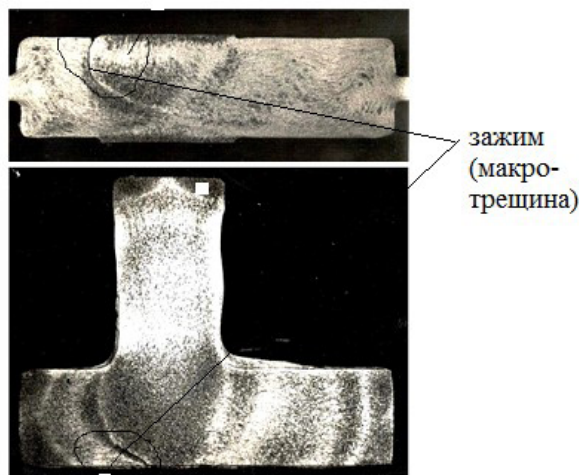


Рис. 4. Макроструктура «Тройника 122»  
 Fig. 4. Macrostructure of "T-joint 122"

с уковом около 4-х, что должно обеспечивать проработку структуры материала на все сечение образца.

Выполнена серия штамповок с получением за ход пресса окончательно оформленных поковок (рис. 3б), а также постадийным формированием тройника (рис. 3в).

Как видно на рис. 3, вначале отростки формируются практически одинаковыми по длине. При этом на начальной стадии (крайний правый образец) поведение металла на торцах отростков четко соответствует указанному в [1], т.е. поверхность, прилегающая к верхнему углу, имеет радиус значительно большей кривизны, чем поверхность, прилегающая к нижнему углу. Таким образом, заполнение верхней гравюры на этой стадии существенно отстает от заполнения нижней гравюры.

В дальнейшем заполнение гравюры становится более равномерным и отростки по форме становятся практически одинаковыми (средняя фигура). Их окончательные форма и размеры достигаются в момент начала вытекания металла в компенсирующие полости.

На рис. 3б видны «хвостики» металла, вышедшие в компенсирующие полости.

При визуальном осмотре образцов полученных моделей поковки «Тройник 122» (рис. 3б) подтвердился прогноз о качественном заполнении ручья с оформлением на конце бокового отростка утолщения заданного размера — Ø19 мм.

На разрезанных в двух продольных направлениях образцах зажимов не обнаружено.

Опираясь на полученные результаты деформирования свинцовых образцов, продолжили отработку технологии штамповки поковки «Тройник 122» на образцах из стали. Был изготовлен сменный инструмент под рабочий блок пресса двойного действия 5000 × 5000 КН и выполнена опытная партия «Тройника 122» из стали 20.

Изучение макроструктуры стальных изделий привело к обнаружению макротрещин, являющихся следствием довольно глубокого зажима (рис. 4).

Такие трещины не заковываются и служат местом разрушения детали при эксплуатации. Они, как правило, визуально не выявляются.

Следовательно, чтобы обеспечить гарантии получения годных поковок, необходимы дополнительные исследования.

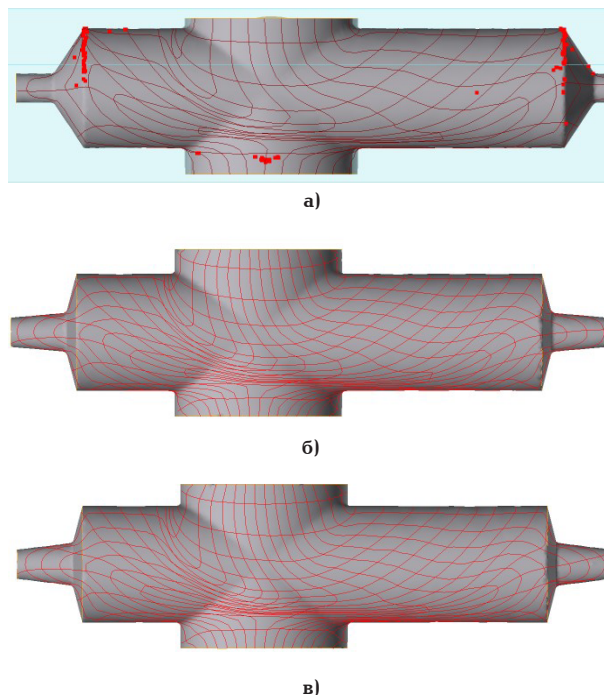


Рис. 5. QForm модели при диаметре заготовки 18 мм:  
 а — компенсатор цилиндрической формы;  
 б — компенсатор конический с углом 5°;  
 в — компенсатор конический с углом 7°  
 Fig. 5. QForm of the model at a blank diameter of 18 mm:  
 а — cylindrical compensator;  
 б — tapered compensator with 5° angle;  
 в — tapered compensator with 7° angle

Таким образом, перешли ко второму этапу исследований, на котором было решено моделировать процесс в программном продукте QForm, так как в распоряжении исследователей имеется данная программа, а также наработан положительный опыт такой работы, изложенный, например, в [13–15].

Здесь преследовалось решение такой задачи, как: добиться моделированием выявления таких размеров исходной заготовки и конфигурации инструмента, которые бы отвечали условиям изготовления качественных изделий. Поэтому в процессе QForm — моделирования принимали разные варианты диаметра исходной заготовки, а также форму и размеры компенсаторов.

Посчитали, что такими вариантами будут следующие:

- 1) на концах отростков изменить конфигурации компенсаторов с цилиндрической на коническую, с варьированием их конусности от 5° до 7°;
- 2) варьировать значениями диаметров исходной заготовки от 18 мм (как при опытной штамповке) до 27 мм с шагом в 1 мм. При этом длины принимать согласно условиям постоянства объема.

Предположительно какое-то из указанных действий должно обеспечить непрерывность поступления пластичного металла в отросток на протяжении всего процесса деформирования и исключить формирование застойной зоны, образующей зажим. Хотя при этом несколько увеличится расход металла.

Полученные результаты моделирования представлены картинками проблемных с точки зрения возможного образования зажима сечений формованных поковок (рис. 5–7).

Вероятность образования зажимов в моделях показывает плотность и степень неравномерно-

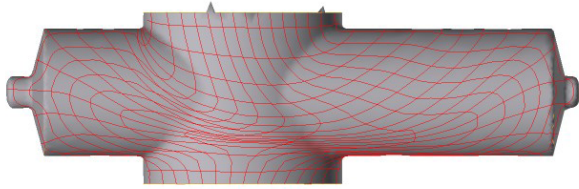


Рис. 6. QForm модель с исходными данными: диаметр заготовки 25 мм, компенсатор цилиндрический  
Fig. 6. QForm model with initial data: blank diameter 25 mm, cylindrical compensator

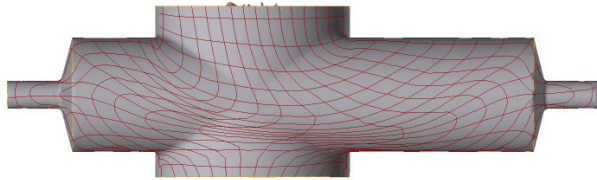


Рис. 7. QForm модель с исходными данными: диаметр заготовки 27 мм, компенсатор цилиндрический  
Fig. 7. QForm model with initial data: blank diameter 27 mm, cylindrical compensator

сти расположения лагранжевых линий. В случаях значительной неравномерности их расположения, а также плотной местной локализации предполагается образование очага застоя металла, который в дальнейшем развивается в зажим.

### 3. Обсуждение результатов экспериментов по моделированию в QForm

Выполнили следующие шаги моделирования:

- расчет варианта, проходившего экспериментальное моделирование;
- расчет с компенсатором в  $5^\circ$  и неизменяемыми размерами заготовки;
- расчет с компенсатором в  $7^\circ$  и неизменяемыми размерами заготовки;
- расчет с цилиндрическим компенсатором и диаметром заготовки в 25 мм;
- расчет с цилиндрическим компенсатором и диаметром заготовки в 27 мм.

1. Как видим на рис. 5а, перемещение объемов деформируемого металла крайне неравномерно: в правом отрезке лагранжевые линии располагаются в более плавном порядке, практически на одинаковых дистанциях, в то время как влево перемещение менее упорядочено и местами линии практически смыкаются, образуя складки. В зоне таких складок можно прогнозировать с большой долей вероятности образование зажимов. Существенно и то, что правый отрезок потока металла идет исключительно из-под пуансона (сверху), а левый отрезок формируется встречными потоками с двух сторон, что создает неравномерность структуры изделия.

Красные точки по торцам поковки показывают места недооформления кромок обоих отрезков, что также вызывает сомнение в получении качественной поковки. Последнее может быть некритично для готовой детали, если предусмотрен достаточный припуск.

2. Картина на рис. 5б имеет схожие черты с отмеченными для рис. 5а в части расположения лагранжевых линий: та же неравномерность в соответствующих частях поковки вплоть до слияния вблизи нижнего контура. Зона слияния очень про-

тяженная и вероятность зажима достаточно велика. При этом отсутствует прогноз не заполнения кромок.

3. Изменение угла конуса компенсатора на  $7^\circ$  (рис. 5в) серьезно не сказалось на обеспечении равномерности дистанций между лагранжевыми линиями в области левого отрезка. Зона слияния лагранжевых линий критична по протяженности. Отсутствует прогноз не оформления кромок отрезков.

4. Модель по рис. 6 демонстрирует, что лагранжевые линии в зоне, прилегающей к границе нижнего центрального участка и правого бокового отрезка, сближены. Однако плотность сближения их имеет меньший уровень (касание или пересечение отсутствуют), чем в предыдущем случае, что дает определенные гарантии отсутствия складкообразования.

5. Вариант моделирования по рис. 7: сетка лагранжевых линий достаточно равномерная с плавными траекториями этих линий. Такое состояние явно не предвещает образования какого-либо зажима. Следует учесть, что в данной модели показано возможное некоторое удлинение отрезка-компенсатора. В таком случае необходимо предусматривать дополнительный объем металла заготовки.

Таким образом, по результатам приведенных обсуждений вариантами бездефектной штамповки следует принять модели, отвечающие исходным данным по приведенным выше пунктам 4 и 5. Но следует учитывать, что выполненные при моделировании расчеты силы деформирования для варианта по рис. 7 значительно выше, чем для варианта по рис. 6.

### Выводы

1. Анализ публикаций по рассматриваемому вопросу показал, что при штамповке в разъемных матрицах изделий с отрезками при различающихся размерах последних есть вероятность брака вследствие образования внутренних дефектов — зажимов.

2. Экспериментальные исследования по штамповке «Тройник 122» из свинцовых заготовок не показали возможности образования зажимов в теле поковки. При этом хорошее качество заполнения гравюры ручья обеспечивалось цилиндрическими компенсирующими полостями.

3. Образцы макрошлифов отштампованных из стали повок «Тройник 122» показали наличие глубоких зажимов, являющихся следствием неравномерного встречного перемещения потоков металла деформируемой заготовки.

4. Выполненное моделирование в QForm горячего деформирования стальной заготовки в разъемной матрице для получения поковки детали «Тройник 122» по вариантам с варьированием параметров заготовки (диаметр) и инструмента (форма компенсатора) позволило выявить наиболее благоприятные условия, исключающие образование зажимов. При этом штамповка выполняется в один переход на прессе двойного действия.

### Заключение

Для промоделированного типоразмера изделия наиболее подходящим следует считать штамповку из заготовки диаметром 25 мм либо 27 мм с выполнением в инструменте компенсаторов цилиндрической формы. Окончательный выбор сечения заготовки определяется наличием профиля соот-

ветствующего диаметра в номенклатуре предприятия, а также удобством нарезки заготовок по длине сдвигом, например, в штампе с редуцированием, что обеспечивает точное дозирование объема заготовки. При этом в случае необходимости проводить допустимые изменения чертежа изделия.

Таким образом, в алгоритм проектирования технологического процесса штамповки тройников рекомендуется предусматривать моделирование по показанной в статье схеме с использованием программного продукта QForm. Такой подход можно считать практической новизной выполняемой разработки в сравнении с применяемыми в настоящее время в производстве подходами.

Для изделия «Тройник 35.06.090 А» моделирование в QForm показало результаты, аналогичные представленным на рис. 5–7.

#### Список источников / References

1. Ребельский А. В., Протопопов О. В., Кузнецов А. В. [и др.] Штамповка поковок в разъемных матрицах // Кузнечно-штамповочное производство. 1962. № 12. С. 3–8.

Rebel'skiy A. V., Protopopov O. V., Kuznetsov A. V. [et al.] Shtampovka pokovok v raz'yemnykh matritsakh [Stamping of forgings in split dies]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1962. No. 12. P. 3–8. (In Russ.).

2. Ребельский А. В., Протопопов О. В., Савин А. М. Изготовление поковок в штампах с разъемными матрицами // Опытные работы по штамповке и выдавливанию: сб. ст. / Моск. дом науч.-тех. пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского. Москва: [б.и.], 1958. С. 12–14.

Rebel'skiy A. V., Protopopov O. V., Savin A. M. Izgotovleniye pokovok v shtampakh s raz'yemnymi matritsami [Manufacturing forgings in dies with split dies] // Opytnyye raboty po shtampovke i vydavlivaniyam: sb. st. *Experimental work on stamping and extrusions: collection of articles*. Moscow, 1958. P. 12–14. (In Russ.).

3. Поляков И. С. Особенности штамповки поковок с боковыми отрогками в закрытых штампах // Кузнечно-штамповочное производство. 1964. № 6. С. 16–20.

Polyakov I. S. Osobennosti shtampovki pokovok s bokovymi otrostkami v zakrytykh shtampakh [Features of stamping forgings with side processes in closed dies]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1964. No. 6. P. 16–20. (In Russ.).

4. Поляков И. С., Золотницкий В. А. Штамповка поковок типа крестовин в закрытых штампах // Кузнечно-штамповочное производство. 1964. № 7. С. 3–6.

Polyakov I. S., Zolotnitskiy V. A. Shtampovka pokovok tipa krestovin v zakrytykh shtampakh [Stamping of cross-type forgings in closed dies]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1964. No. 7. P. 3–6. (In Russ.).

5. Кузнецов А. В., Протопопов О. В. Двухпереходный технологический процесс горячего выдавливания стальных поковок в разъемных матрицах // Кузнечно-штамповочное производство. 1966. № 7. С. 18–20.

Kuznetsov A. V., Protopopov O. V. Dvukhperekhodnyy tekhnologicheskii protsess goryachego vydavlivaniya stal'nykh pokovok v raz'yemnykh matritsakh [Two-pass technological process of hot extrusion of steel forgings in split dies]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Forging and Stamping Production*. 1966. No. 7. P. 18–20. (In Russ.).

6. Jing Y., Haibao Wu., Xuedao Sh. Shape-property synergistic control in closed die forging of large-diameter copper alloy valve body. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 128, no. 5-6. P. 2137–2146. DOI: 10.1007/s00170-023-11873-5.

7. Hawryluk M., Ziemba J., Janik M. [et al.]. Wear Analysis of Forging Tools Used in an Industrial Production Process – Hot

Forging in Closed Dies of the «Head-Disk» of an Engine Valve Forging. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 22. P. 7063. DOI: 10.3390/ma14227063.

8. Huang K. M., Hsu M. N., Ramanuel J. [et al.] Improvement of product quality using negative clearance grooved punch. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125, no. 1-2. P. 479–492. DOI: 10.1007/s00170-022-10383-0.

9. Hawryluk M., Rychlik M., Ziemba Ja. [et al.]. Analysis of the production process of the forked forging used in the excavator drive system in order to improve the currently implemented technology by the use of numerical modeling. *Materials Science-Poland*. 2021. Vol. 39, no. 2. P. 227–239. DOI: 10.2478/msp-2021-0020.

10. Алиева Л. И., Титов А. В., Корденко М. Ю. Моделирование процессов поперечного бокового выдавливания // Обработка материалов тиском. 2019. № 1. С. 35–44. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-35(48).

Aliyeva L. I., Titov A. V., Kordenko M. Yu. Modelirovaniye protsessov poperechnogo bokovogo vydavlivaniya [Modeling of transverse lateral extrusion processes]. *Obrobka materialiv tiskom. Processing of Materials with a Press*. 2019. No. 1. P. 35–44. DOI: 10.37142/2076-2151/2019-35(48). (In Russ.).

11. Zhang Y., Sun H., Liu B. [et al.]. Surface crack analysis of the steering shaft gear after carburizing and quenching. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 141. P. 106680. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106680.

12. Ашкеев Ж. Б., Андреященко В. А., Абишкенов М. Ж., Буканов Ж. У. Определение напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 4. С. 5–12. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.01. EDN: YPTVHD.

Ashkeyev Zh. B., Andreyashchenko V. A., Abishkenov M. Zh., Bukanov Zh. U. Opredeleniye napryazhennogo sostoyaniya i usiliya deformatsii sharoobraznykh zagotovok v zakrytoy matritse [Determination of the stress state and the force of deformation of ball-shaped billets in a closed matrix]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika. PNRPU Mechanics Bulletin*. 2021. No. 4. P. 5–12. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.4.01. EDN: YPTVHD. (In Russ.).

13. Gryaznov V. V., Konovalov V. A., Kormakov D. A., Markechko I. V., Merkushev E. N. Simulation of the isothermal stamping of cryogenic equipment body parts forgings // *Oil and Gas Engineering (OGE-2021). AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2412, no. 1. P. 040013. DOI: 10.1063/5.0074976.

14. Кормаков Д. А., Маркечко И. В. Исследование технологических параметров операции прошивки с радиальным выдавливанием // Инновации и инвестиции. 2020. № 9. С. 153–156. EDN: MCDKCU.

Kormakov D. A., Markechko I. V. Issledovaniye tekhnologicheskikh parametrov operatsii proshivki s radial'nym vydavlivaniyem [Investigation of technological parameters of the radial extrusion firmware operation]. *Innovations and Investments*. 2020. No. 9. P. 153–156. EDN: MCDKCU. (In Russ.).

15. Грязнов В. В., Кормаков Д. А., Меркушев Е. Н. [и др.]. Исследование и моделирование процессов горячей штамповки равнопроходного тройника диаметром 530 мм, получаемого из стали 10Г2ФБИЮ // Ученые Омска — региону: материалы VI Регион. науч.-техн. конф. (Омск, 24–26 мая 2021 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. С. 15–19. EDN: WICSMX.

Gryaznov V. V., Kormakov D. A., Merkushev E. N. [et al.]. Issledovaniye i modelirovaniye protsessov goryachey shtampovki ravnoprokhodnogo troynika diametrom 530 mm, poluchayemogo iz stali 10G2FBYU [Research and modeling of hot stamping processes of an equal-bore tee with a diameter of 530 mm, obtained from 10G2FBYU steel] // *Uchenyye Omska — regionu. Scientists of Omsk — to the region. Omsk*, 2021. P. 15–19. EDN: WICSMX. (In Russ.).

**ГРЯЗНОВ Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566730

AuthorID (SCOPUS): 57516935900

Адрес для переписки: gryaznov-1946@mail.ru

**КОНОВАЛОВ Валерий Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9702-2809

AuthorID (РИНЦ): 684448

AuthorID (SCOPUS): 57398211400

Адрес для переписки: Valerij.Konov.1956@mail.ru

**КОРМАКОВ Дмитрий Александрович**, старший преподаватель кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1699-2068

AuthorID (РИНЦ): 831541

ORCID: 0000-0001-7101-0140

AuthorID (SCOPUS): 57210976601

Адрес для переписки: dakormakov@omgtu.ru

**МАРКЕЧКО Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1444-3170

AuthorID (РИНЦ): 566729

AuthorID (SCOPUS): 57210977051

Адрес для переписки: markechko55@mail.ru

**МЕРКУШЕВ Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ОмГТУ, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 566731

AuthorID (SCOPUS): 9249134900

Адрес для переписки: emerkushev@rambler.ru

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

Статья поступила в редакцию 17.12.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2025; принята к публикации 29.04.2025.

**ГРЯЗНОВ Vladimir Vasilevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

AuthorID (RSCI): 566730

AuthorID (SCOPUS): 57516935900

Correspondence address: gryaznov-1946@mail.ru

**KONOVALOV Valeriy Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9702-2809

AuthorID (RSCI): 684448

AuthorID (SCOPUS): 57398211400

Correspondence address: Valerij.Konov.1956@mail.ru

**KORMAKOV Dmitry Aleksandrovich**, Senior Lecturer of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1699-2068

AuthorID (RSCI): 831541

ORCID: 0000-0001-7101-0140

AuthorID (SCOPUS): 57210976601

Адрес для переписки: dakormakov@omgtu.ru

**MARKECHKO Igor Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1444-3170

AuthorID (RSCI): 566729

AuthorID (SCOPUS): 57210977051

Correspondence address: markechko55@mail.ru

**MERKUSHEV Evgeniy Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Equipment and Technologies for Mechanical Engineering Production Department, OmSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 566731

AuthorID (SCOPUS): 9249134900

Correspondence address: emerkushev@rambler.ru

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

The article was submitted 17.12.2024; approved after reviewing 20.03.2025; accepted for publication 29.04.2025.

## СОПРЯЖЕНИЕ КРИВЫХ БЕЗЬЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЛАДКОГО СОЕДИНЕНИЯ КРИВЫХ И СКРУГЛЕНИЯ УГЛОВ

О. В. Кривошеев<sup>1,2</sup>, С. В. Маврин<sup>1,2</sup>, А. С. Старкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров  
<sup>2</sup>Саровский физико-технический институт –  
филиал «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Саров

Предлагается аналитический метод гладкого соединения двух кривых Безье произвольной степени соединительной линией, являющейся также кривой Безье. В точках сопряжения соединительной линии с исходными кривыми реализуется порядок гладкости, соответствующий степеням исходных кривых. На соединительную линию могут быть наложены дополнительные ограничения, которые часто возникают при решении реальных конструкторских задач. Доказаны теоремы о необходимых условиях существования соединительной кривой. Возможности предлагаемого метода применяются для решения следующих задач: гладкого соединения двух исходно заданных кривых Безье и гладкого скругления внутреннего угла, образованного пересекающимися исходно заданными кривыми Безье. Решение второй задачи позволяет выполнить как симметричное, так и несимметричное скругление углов, образованных пересечением не прямых линий, с сохранением высокой степени гладкости в точках сопряжения. Показано влияние дополнительных ограничений на форму соединительной кривой.

Предлагаемый математический метод основан на решении системы линейных уравнений, в которой уравнениями являются условия равенства производных в точках сопряжения и в точках дополнительных ограничений. Кривые Безье представляются как частные случаи В-сплайна. Предлагаемый метод применим как для 2D, так и для 3D случаев.

**Ключевые слова:** кривая Безье, параметрическая непрерывность, сопряжение, CAD-системы, геометрическое ядро, системы полного жизненного цикла «САРУС».

**Для цитирования:** Кривошеев О. В., Маврин С. В., Старкова А. С. Сопряжение кривых Безье для задач гладкого соединения кривых и скругления углов // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 26–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-26-34. EDN: PMANTK.



© Кривошеев О. В., Маврин С. В., Старкова А. С., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## BEZIER CURVE CONJUGATION FOR SMOOTH CURVE JOINING AND CORNER ROUNDING

O. V. Krivosheev<sup>1,2</sup>, S. V. Mavrin<sup>1,2</sup>, A. S. Starkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia  
<sup>2</sup>Sarov Institute of Physics and Technology –  
Branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”, Sarov, Russia

The authors propose an analytical method for the smooth connection of two Bezier curves of arbitrary degree using a connecting curve, which is also a Bezier curve. At the points of connection between the connecting curve and the original curves, the smoothness order corresponds to the degrees of the original curves. Additional constraints can be imposed on the connecting curve, which frequently arise when addressing practical design challenges. Theorems establishing the necessary conditions for the existence of the connecting curve are proven. The capabilities of the proposed method are demonstrated by solving two problems: the smooth connection of two initially given Bezier curves and the smooth rounding of an interior corner formed by intersecting initially given Bezier curves. The solution to the second problem enables both symmetric and asymmetric rounding of corners formed by the intersection of non-straight lines, while maintaining a high degree of smoothness at the connection points. The influence of additional constraints on the connecting curve's shape is shown.

The proposed mathematical method is based on solving a system of linear equations, where the equations represent the derivative equality conditions at the connection points and at the points where additional constraints are applied. Bezier curves are treated as special cases of B-splines. The proposed method is applicable to both 2D and 3D scenarios.

**Keywords:** Bezier curve, parametric continuity, conjugation, CAD-systems, geometric kernel, full life cycle systems "SARUS".

**For citation:** Krivosheev O. V., Mavrin S. V., Starkova A. S. Bezier curve conjugation for smooth curve joining and corner rounding. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 26–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-26-34. EDN: PMANTK.



© Krivosheev O. V., Mavrin S. V., Starkova A. S., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

## Введение

В настоящее время разработка новых изделий ведется на системах автоматизированного проектирования (САПР), которые включают в себя CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing) и CAE (Computer-Aided Engineering) системы. В основе этих систем лежит геометрическое ядро, которое позволяет создавать двухмерные и трехмерные геометрические объекты и проводить операции с этими объектами [1]. В современных САПР одним из основных геометрических объектов является NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) и частный случай NURBS — кривые Безье.

Соединение линий и поверхностей с заданным порядком гладкости (непрерывности<sup>1</sup>) является одной из постоянно используемых операций в САД-системах. Требования к гладкости определяют физические задачи, могут быть вызваны эстетическими [2] и технологическими аспектами изготовления изделий. Эти требования, например, возникают при конструировании лопаток турбин, гребных винтов, поверхности летательных аппаратов, корпусов судов, кузовов современных автомобилей, при проектировании автомобильных и железнодорожных трасс и т. д. Описать такие контуры сложной формы аналитическими функциями невозможно, поэтому для их представления в САПР используют кусочно-непрерывные методы аппроксимации, основанные на NURBS [3]. При аппроксимации построенная кривая или поверхность пройдет вблизи заданных точек, но при этом она будет обладать необходимой гладкостью. При интерполяции, наоборот, кривая или поверхность гарантировано проходит через заданные точки, но теряет гладкость.

Например, в работе [4] с помощью дробно-рациональных сегментов Безье 2-го порядка строится замкнутый сплайн Безье, проходящий через заданные точки, при этом порядок гладкости не превышает  $C^2$ . В [5] на плоскости строится сплайн, составленный из кубических кривых Безье по заданным узлам интерполяции.

На сегодняшний день кривые Безье находят широкое применение в геометрическом моделировании в задачах, в которых важна форма линий. Например, в работе [6] приводится обзор методов обработки кривых Безье (подгонка, манипуляция, слияние и блендинг) в САД и их приложения для нужд производства (оптимизация траектории движения инструмента, проектирование профилей, реверс-инжиниринг и т. д.).

В современной научной литературе вопросам по сопряжению кривых Безье с определенным порядком гладкости уделяется достаточное внимание. Так,

автор работы [7] для проектирования автомобильной трассы использует сплайн Безье, составленный из сегментов кубических кривых Безье, состыкованных между собой с порядком гладкости  $C^2$ . В работе [8] графоаналитическими методами строится плоская и пространственная кривая Безье, образованная кубическими сегментами с непрерывностью  $G^2$  и проходящая через заданные узловые точки с указанными в них направляющими векторами и радиусами кривизны. В [9] итеративным методом на плоскости строится сплайн, состоящий из кубических кривых Безье, сглаживающий ломаную линию и обеспечивающий непрерывность первой и второй производных. Работы [10, 11], основанные на принципах «множественного сопряжения» (объединения нескольких сегментов в один), предлагают более эффективные итеративные алгоритмы для создания сплайна из смежных сегментов кривых Безье по сравнению с алгоритмами, основанными на «парном сопряжении» [12, 13].

В ограниченном количестве работ по сопряжению кривых Безье авторы вводят еще и дополнительные ограничения, накладываемые на сопрягающую (или аппроксимирующую) кривую. Так, например, в работе [14] приводится метод полностью гладкого сопряжения двух кривых Безье, при этом задается простейшее ограничение — точка, через которую должна пройти аппроксимирующая кривая.

В [15] авторы предлагают подход, позволяющий наложить на аппроксимирующую кривую дополнительные ограничения в виде полного совпадения этой кривой с одной из заданных, или прохождения через заданную точку и равенства производных заданным значениям в этой точке.

Необходимо также отметить, что, как показал опыт практического применения САД-модуля *Системы полного жизненного цикла (СПЖЦ) «САРУС»* [16], при разработке реальных конструкций практически всегда возникают дополнительные ограничения. Они могут представлять собой, например, места креплений, которых обязательно должна касаться конструкция, и/или значения производных в заданных точках, которые определяются требованиями гидроаэродинамики, эстетики, гладкости трасс и т. д.

Настоящая работа является дальнейшим развитием общих подходов к сопряжению кривых Безье, представленных в работах [15, 17, 18], а также формулирует новую постановку задачи.

Целью настоящей работы является разработка математических методов соединения исходных кривых Безье соединительной линией, которая также

является кривой Безье. При этом порядок непрерывности в точках сопряжения может быть любым вплоть до степени исходных кривых, и на соединительную кривую могут быть наложены дополнительные ограничения в виде точек, через которые должны пройти соединительная линия и/или значения производных в этих точках.

Новизной работы по сравнению с работами [15, 17] является новая постановка задачи, а по сравнению с [18] — более общая постановка задачи.

В работе решаются следующие задачи. Формулируются условия гладкого сопряжения соединительной кривой с двумя исходными кривыми Безье, которые могут иметь разные степени, при этом соединительная кривая также представляется как кривая Безье. На соединительную кривую могут быть наложены дополнительные ограничения. Порядок гладкости в точках сопряжения может быть задан произвольно вплоть до степеней исходных кривых. Условия непрерывности сводятся к системе линейных уравнений, решением которой являются координаты контрольных точек соединительной кривой Безье. Дополнительные ограничения приводят к увеличению степени соединительной кривой, что в свою очередь приводит к увеличению числа уравнений в системе. Доказываются теоремы о степени соединительной кривой, которые являются необходимыми условиями существования соединительной кривой. В качестве результата применения метода рассматриваются две задачи — гладкое соединение в граничных точках исходных кривых и скругление внутреннего угла, образованного пересекающимися исходными кривыми Безье. Вторая задача позволяет производить как симметричное, так и несимметричное скругление углов, образованных пересечением не прямых линий, с сохранением непрерывности в точках сопряжения. Кривые Безье, как и в работах [15, 17, 18], представляются как частные случаи В-сплайна, что позволяет воспользоваться программными функциями геометрического ядра, которые за один вызов позволяют получить как значения базисных функций, так и все их производные, вплоть до порядка, соответствующего степени кривой Безье. Кроме этого, такое представление кривых Безье позволяет с минимальными затратами распространить полученные результаты на В-сплайны и NURBS, которые в настоящее время реализованы в геометрических ядрах современных САПР. Рассматриваемые методы применимы как для плоских, так и для пространственных кривых.

### Постановка задачи

Даны две исходные кривые Безье  $P(u)$  и  $Q(v)$  степени  $n_p$  и  $n_q$  соответственно. На каждой из кривых заданы точки  $P_*$  и  $Q_*$ , и соответствующие этим точкам значения параметрических переменных  $u_0$  и  $v_0$ :

$$P_* = P(u)|_{u=u_0}, u_0 \in [0,1],$$

$$Q_* = Q(v)|_{v=v_0}, v_0 \in [0,1].$$

Необходимо определить соединительную кривую Безье  $R(t)$ , которая соединит точки  $P_*$  и  $Q_*$ , при этом в точках сопряжения должны выполняться условия гладкого сопряжения вплоть до порядка, равного степени соответствующих кривых:

$$\begin{cases} P^{(k_p)}(u)|_{u=u_0} = R^{(k_p)}(t)|_{t=0}, & k_p = \overline{0, n_p}, \\ R^{(k_q)}(t)|_{t=1} = Q^{(k_q)}(v)|_{v=v_0}, & k_q = \overline{0, n_q}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_p$  и  $k_q$  — порядок производных (здесь и далее по тексту нулевая производная соответствует значению функции) параметрических функций  $P(u)$  и  $Q(v)$  соответственно.

На соединительной кривой  $R(t)$  может быть дополнительно задана точка  $R_*$  и соответствующее значение параметрической переменной  $t_0$ :

$$R_* = R(t)|_{t=t_0}, t_0 \in [0,1]. \quad (2)$$

Ограничение (2) может быть дополнено заданием значений производных кривой  $R(t)$  в точке  $R_*$ :

$$R^{(k_r)}(t)|_{t=t_0} = D_{k_r}, k_r = \overline{0, K}, \quad (3)$$

где  $R^{(k_r)}$  — производная  $k_r$ -го порядка;  $D_{k_r}$  — заданное значение  $k_r$ -й производной;  $K$  — максимальный порядок производной.

### Необходимые условия гладкого сопряжения

Теорема 1. Для выполнения условий гладкого сопряжения вида (1) и единственности соединительной кривой  $R(t)$  необходимо, чтобы степень соединительной кривой Безье была равна:

$$n_{r1} = n_p + n_q = 1, \quad (4)$$

где  $n_{r1}$  — степень соединительной кривой Безье  $R(t)$  при выполнении (1).

Доказательство. Условия в системе (1), определяющие производные порядка от 0 до  $n_p$  для кривой  $R(t)$  в точке  $t = 0$  и от 0 до  $n_q$  для кривой  $R(t)$  в точке  $t = 1$ , задают  $[(n_p + 1) + [(n_q + 1)]$  линейных уравнений относительно неизвестных  $R_l, l = \overline{0, n_{r1}}$ .

Запишем производную функции, которая описывает кривую Безье как линейную комбинацию производных базисных функций с контрольными точками в качестве коэффициентов:

$$R^{(k)}(t) = \sum_{l=0}^{n_{r1}} N_{l, n_{r1}}^{(k)}(t) R_l, \quad (5)$$

где  $k$  — порядок производной;  $N_{l, n_{r1}}^{(k)}(t)$  —  $k$ -я производная  $l$ -й базисной функции степени  $n_{r1}$ ;  $R_l$  — контрольные точки кривой  $R(t)$ ;  $l = \overline{0, n_{r1}}$ .

Запишем условия из системы (1), используя (5):

$$\begin{cases} \sum_{l=0}^{n_{r1}} N_{l, n_{r1}}^{(k_p)}(0) R_l = P^{(k_p)}(u)|_{u=u_0}, k_p = \overline{0, n_p}, \\ \sum_{l=0}^{n_{r1}} N_{l, n_{r1}}^{(k_q)}(1) R_l = Q^{(k_q)}(v)|_{v=v_0}, k_q = \overline{0, n_q}. \end{cases} \quad (6)$$

Рассматривая систему (6) как систему линейных уравнений относительно  $R_l, l = \overline{0, n_{r1}}$  неизвестных, можно видеть, что для того, чтобы система была совместной и определенной (имела единственное решение), необходимо, чтобы число неизвестных было равно числу уравнений. Таким образом, количество контрольных точек кривой  $R(t)$  должно быть равно  $((n_p + 1) + (n_q + 1))$ , и, следовательно, степень кривой будет на единицу меньше, т. е. (4). Если количество контрольных точек кривой  $R(t)$  превышает  $n_{r1}$ , то система (6) становится неопределенной, т. е. будет иметь множество решений и, следовательно, единственность кривой  $R(t)$  будет отсутствовать.

Если количество контрольных точек кривой  $R(t)$  будет меньше  $n_{r1}$ , то система становится не-

совместной и, следовательно, не имеет точного решения.

Теорема 2. Для выполнения условий гладкого сопряжения вида (1) при дополнительных ограничениях (3) и единственности соединительной кривой  $R(t)$  необходимо, чтобы степень соединительной кривой Безье была равна:

$$n_{r2} = n_{r1} + (K + 1), \quad (7)$$

где  $n_{r2}$  — степень соединительной кривой Безье  $R(t)$  при дополнительных ограничениях вида (3);  $(K + 1)$  — количество дополнительных ограничений.

Доказательство. По аналогии с доказательством теоремы 1 можно доказать, что системе (1) при ограничениях (3) соответствует следующая система линейных уравнений относительно  $R_l$  неизвестных,  $l = \overline{0, n_{r2}}$ :

$$\begin{cases} \sum_{l=0}^{n_{r2}} N_{l,n_{r2}}^{(k_p)}(0)R_l = P^{(k_p)}(u)|_{u=u_0}, k_p = \overline{0, n_p}, \\ \sum_{l=0}^{n_{r2}} N_{l,n_{r2}}^{(k_r)}(t_0)R_l = D_{k_r}, k_r = \overline{0, K}, \\ \sum_{l=0}^{n_{r2}} N_{l,n_{r2}}^{(k_q)}(1)R_l = Q^{(k_q)}(v)|_{v=v_0}, k_q = \overline{0, n_q}. \end{cases} \quad (8)$$

Проводя рассуждения, аналогичные доказательству теоремы 1, можно доказать, что для существования единственности соединительной кривой степень кривой  $R(t)$  должна быть равна (7).

**Метод решения задачи без дополнительных ограничений**

Представим исходные кривые Безье  $P(u)$  и  $Q(v)$  как частный случай В-сплайна [17]:

$$P(u) = \sum_{i=0}^{n_p} N_{i,n_p}(u)P_i, u \in [0,1], \quad (9)$$

$$Q(v) = \sum_{j=0}^{n_q} N_{j,n_q}(v)Q_j, v \in [0,1], \quad (10)$$

где  $n_p, n_q$  — степени кривых Безье  $P(u), Q(v)$  соответственно;  $N_{i,n_p}(u), N_{j,n_q}(v)$  —  $i$ -я и  $j$ -я базисные функции В-сплайна степени  $n_p$  и  $n_q$  соответственно;  $P_i, Q_j$  — контрольные точки кривых Безье  $P(u), Q(v)$  соответственно;  $i = \overline{0, n_p}, j = \overline{0, n_q}$ .

Узловые векторы кривых (9) и (10) представляются как узловые векторы В-сплайна:

$$U = (\underbrace{0, \dots, 0}_{n_p}, 0, 1, \underbrace{1, \dots, 1}_{n_p}),$$

$$V = (\underbrace{0, \dots, 0}_{n_q}, 0, 1, \underbrace{1, \dots, 1}_{n_q}).$$

Записывая соединительную кривую Безье  $R(t)$  так же в виде В-сплайна, условия гладкого сопряжения (1) можно записать:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{n_p} N_{i,n_p}^{(k_p)}(u_0)P_i = \sum_{l=0}^{n_{r1}} N_{l,n_{r1}}^{(k_p)}(0)R_l, k_p = \overline{0, n_p}, \\ \sum_{l=0}^{n_{r1}} N_{l,n_{r1}}^{(k_r)}(1)R_l = \sum_{j=0}^{n_q} N_{j,n_q}^{(k_r)}(v_0)Q_j, k_r = \overline{0, n_q}, \end{cases} \quad (11)$$

где верхний индекс базисных функций соответствует порядку производных,  $n_{r1}$  — степень соединительной кривой при отсутствии дополнительных ограничений.

Используя алгоритм расчета базисных функций, реализованный в СПЖЦ «САРУС» [17] за одно обращение к соответствующей функции, можно получить как все необходимые базисные функции, так и все их производные, которые представляются в виде квадратной матрицы порядка  $(p + 1)$ :

$$D(u) = \begin{bmatrix} N_{0,p}^{(0)}(u) & N_{1,p}^{(0)}(u) & \dots & N_{p,p}^{(0)}(u) \\ N_{0,p}^{(1)}(u) & N_{1,p}^{(1)}(u) & \dots & N_{p,p}^{(1)}(u) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,p}^{(k)}(u) & N_{1,p}^{(k)}(u) & \dots & N_{p,p}^{(k)}(u) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $p$  — степень кривой Безье;  $k$  — порядок производной,  $k = \overline{0, p}$ .

В предельных точках области определения параметрической переменной матрица (12) имеет вид нижних треугольных матриц:

$$D(0) = \begin{bmatrix} N_{0,p}^{(0)}(0) & 0 & \dots & 0 \\ N_{0,p}^{(1)}(0) & N_{1,p}^{(1)}(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,p}^{(k)}(0) & N_{1,p}^{(k)}(0) & \dots & N_{p,p}^{(k)}(0) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$D(1) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & N_{p,p}^{(0)}(1) \\ 0 & \dots & N_{p-1,p}^{(1)}(1) & N_{p,p}^{(1)}(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ N_{0,p}^{(k)}(1) & \dots & N_{p-1,p}^{(k)}(1) & N_{p,p}^{(k)}(1) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Система (11) представляет собой систему линейных уравнений относительно  $(n_{r1} + 1)$  неизвестных, которые являются контрольными точками соединительной кривой  $R_p, l = \overline{0, n_{r1}}$ .

В матричном виде система (11) выглядит следующим образом:

$$A \cdot \vec{X} = \vec{B}, \quad (15)$$

где  $A$  — квадратная матрица коэффициентов системы порядка  $(n_{r1} + 1)$ ;  $\vec{X}, \vec{B}$  — вектор-столбцы размера  $(n_{r1} + 1)$  неизвестных и свободных членов соответственно.

Матрица коэффициентов  $A$  в (15) может быть представлена как блочная матрица:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

где  $A_{n,m}$  — матрицы;  $n, m = \overline{1, 2}$ .

$A_{1,1}$  — нижняя треугольная матрица порядка  $(n_p + 1)$ , элементами которой являются первые  $(n_p + 1)$  строк и столбцов матрицы  $D(0)$  (13), рассчитанной для кривой  $R(t)|_{t=0}$ :

$$A_{11} = \begin{bmatrix} N_{0,n_{r1}}^{(0)}(0) & 0 & \dots & 0 \\ N_{0,n_{r1}}^{(1)}(0) & N_{1,n_{r1}}^{(1)}(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0,n_{r1}}^{(n_p)}(0) & N_{1,n_{r1}}^{(n_p)}(0) & \dots & N_{n_p,n_{r1}}^{(n_p)}(0) \end{bmatrix}.$$

$A_{12}$  — нулевая матрица размера  $(n_p + 1) \times (n_q + 1)$ .

$A_{21}$  — нулевая матрица размера  $(n_q + 1) \times (n_p + 1)$ .

$A_{22}$  — нижняя треугольная матрица порядка  $(n_q + 1)$ , элементы которой получены удалением первых  $(n_p + 1)$  столбцов и последних  $(n_p + 1)$  строк:

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & N_{n_{r1}, n_{r1}}^{(0)}(1) \\ 0 & \dots & N_{n_{r1}-1, n_{r1}}^{(1)}(1) & N_{n_{r1}, n_{r1}}^{(1)}(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ N_{n_{r1}-n_q, n_{r1}}^{(n_q)}(1) & \dots & N_{n_{r1}-1, n_{r1}}^{(n_q)}(1) & N_{n_{r1}, n_{r1}}^{(n_q)}(1) \end{bmatrix}.$$

Вектор-столбец  $\vec{B}$  в блочном виде выглядит следующим образом:

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \vec{B}_0 \\ \vec{B}_1 \end{bmatrix},$$

где  $\vec{B}_0, \vec{B}_1$  — вектор-столбцы.

$\vec{B}_0$  — вектор-столбец размера  $(n_p + 1)$ , рассчитанный как

$$\vec{B}_0 = D_p(u_0) \cdot \vec{P}, \quad (16)$$

где  $D_p(u_0)$  — квадратная матрица порядка  $(n_p + 1)$  вида (12), рассчитанная для кривой  $P(u)|_{u=u_0}$ ;  $\vec{P}$  — вектор-столбец размера  $(n_p + 1)$ , элементами которого являются контрольные точки кривой  $P(u)$ .

$\vec{B}_1$  — вектор-столбец размера  $(n_q + 1)$ , рассчитанный как

$$\vec{B}_1 = D_q(v_0) \cdot \vec{Q}, \quad (17)$$

где  $D_q(v_0)$  — квадратная матрица порядка  $(n_q + 1)$  вида (12), рассчитанная для кривой  $Q(v)|_{v=v_0}$ ;  $\vec{Q}$  — вектор-столбец размера  $(n_q + 1)$ , элементами которого являются контрольные точки кривой  $Q(v)$ .

Обратим внимание, что при решении 2D задачи векторы  $\vec{R}, \vec{P}$  и  $\vec{Q}$  — двумерные, а при решении 3D задачи эти векторы — трехмерные, что верно и для задачи с дополнительными ограничениями.

### Метод решения задачи

#### с дополнительными ограничениями

Представим дополнительные ограничения (3) в виде В-сплайна и его производных:

$$\sum_{l=0}^{n_{r2}} N_{l, n_{r2}}^{(k_r)}(t_0) R_l = D_{k_r}, k_r = \overline{0, K}, \quad (18)$$

где верхний индекс у базисных функций соответствует порядку производных;  $n_{r2}$  — степень соединительной кривой при наложении дополнительных ограничений.

Объединяя систему линейных уравнений (11) и (18), получим систему  $(n_{r2} + 1)$  уравнений, относительно  $(n_{r2} + 1)$  неизвестных, которые представляют собой контрольные точки соединительной кривой —  $R_l, l = \overline{0, n_{r2}}$ :

$$C \cdot \vec{Y} = \vec{F}, \quad (19)$$

где  $C$  — квадратная матрица коэффициентов системы порядка  $(n_{r2} + 1)$ ;  $\vec{Y}, \vec{F}$  — вектор-столбцы размера  $(n_{r2} + 1)$  неизвестных и свободных членов соответственно.

Матрица коэффициентов  $C$  в (19) может быть представлена как блочная:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ & C_{21} \\ C_{31} & C_{32} \end{bmatrix},$$

где  $C_{n,m}$  — матрицы;  $n = \overline{1, 3}, m = \overline{1, 2}$ .

$C_{11}$  — нижняя треугольная матрица порядка  $(n_p + 1)$ , элементами которой являются первые  $(n_p + 1)$  строк и столбцов матрицы  $D(0)$  (13), рассчитанной для кривой  $R(t)|_{t=t_0}$ :

$$C_{11} = \begin{bmatrix} N_{0, n_{r2}}^{(0)}(0) & 0 & \dots & 0 \\ N_{0, n_{r2}}^{(1)}(0) & N_{1, n_{r2}}^{(1)}(0) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0, n_{r2}}^{(n_p)}(0) & N_{1, n_{r2}}^{(n_p)}(0) & \dots & N_{n_p, n_{r2}}^{(n_p)}(0) \end{bmatrix}.$$

$C_{12}$  — нулевая матрица размера  $[(n_p + 1) \times (n_{r2} - n_p)]$ .

$C_{21}$  — матрица размера  $[(K + 1) \times (n_{r2} + 1)]$ , элементами которой являются первые  $(K + 1)$  строк матрицы  $D(t)|_{t=t_0}$  (12), рассчитанной для кривой  $R(t)|_{t=t_0}$ :

$$C_{21} = \begin{bmatrix} N_{0, n_{r2}}^{(0)}(t_0) & N_{1, n_{r2}}^{(0)}(t_0) & \dots & N_{n_{r2}, n_{r2}}^{(0)}(t_0) \\ N_{0, n_{r2}}^{(1)}(t_0) & N_{1, n_{r2}}^{(1)}(t_0) & \dots & N_{n_{r2}, n_{r2}}^{(1)}(t_0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{0, n_{r2}}^{(K)}(t_0) & N_{1, n_{r2}}^{(K)}(t_0) & \dots & N_{n_{r2}, n_{r2}}^{(K)}(t_0) \end{bmatrix}.$$

$C_{31}$  — нулевая матрица размера  $[(n_q + q) \times (n_{r2} - n_q)]$ .

$C_{32}$  — нижняя треугольная матрица порядка  $(n_q + 1)$ , элементы которой получены удалением первых  $(n_p + 1 + K + 1)$  столбцов и последних  $(n_p + 1 + K + 1)$  строк:

$$C_{32} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & N_{n_{r2}, n_{r2}}^{(0)}(1) \\ 0 & \dots & N_{n_{r2}-1, n_{r2}}^{(1)}(1) & N_{n_{r2}, n_{r2}}^{(1)}(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ N_{n_{r2}-n_q, n_{r2}}^{(n_q)}(1) & \dots & N_{n_{r2}-1, n_{r2}}^{(n_q)}(1) & N_{n_{r2}, n_{r2}}^{(n_q)}(1) \end{bmatrix}.$$

Вектор-столбец  $\vec{F}$  в блочном виде выглядит следующим образом:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} \vec{F}_0 \\ \vec{F}_1 \\ \vec{F}_2 \end{bmatrix},$$

где  $\vec{F}_i$  — вектор-столбцы;  $i = \overline{0, 2}$ .

$\vec{F}_0$  — вектор-столбец размера  $(n_p + 1)$ , расчет которого полностью совпадает с расчетом вектора  $\vec{B}_0$  (16).

$\vec{F}_1$  — вектор-столбец размера  $[(K + 1) \times (n_{r2} + 1)]$ , рассчитанный как

$$\vec{F}_1 = D_r(t_0) \cdot \vec{D},$$

где  $D_r(t_0)$  — матрица размера  $[(K + 1) \times (n_{r2} + 1)]$ , которая представляет собой первые  $(K + 1)$  строк матрицы  $D(t)|_{t=t_0}$ , рассчитанной для кривой  $R(t)|_{t=t_0}$ ;  $\vec{D}$  — вектор-столбец, элементы которого образованы значениями ограничений (правые части системы (18)).

$\vec{F}_2$  — вектор-столбец размера  $(n_q + 1)$ , расчет которого полностью совпадает с расчетом вектора  $\vec{B}_1$  (17).

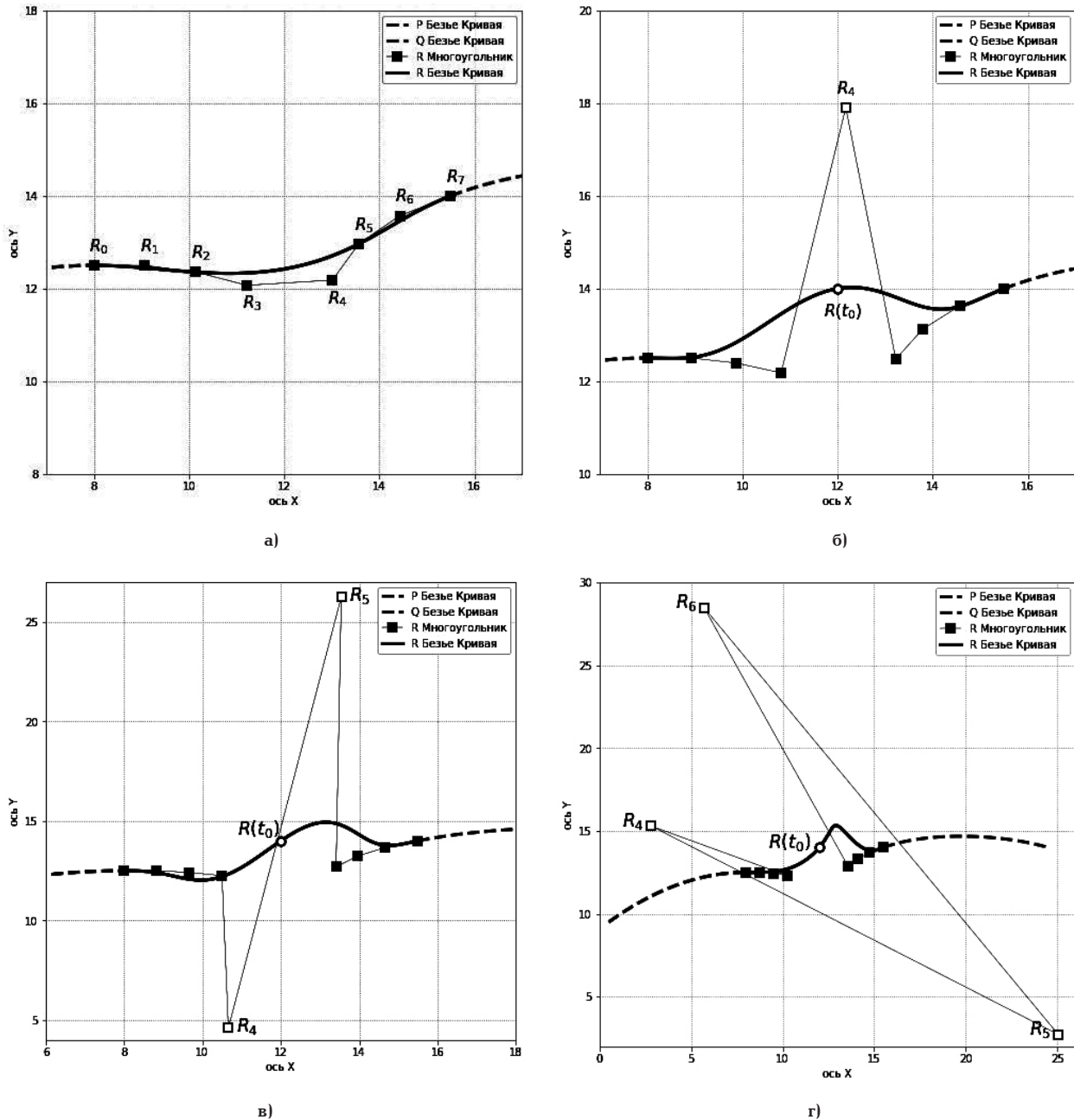


Рис. 1. Гладкое соединение с непрерывностью  $C^3$ : а — без дополнительных ограничений; б — ограничения (20); в — ограничения (20–21); г — ограничения (20–22)  
 Fig. 1. Smooth connection with  $C^3$  continuity: а — without additional constraints; б — constraints (20); в — constraints (20–21); г — constraints (20–22)

### Результаты и обсуждение

Изложенные выше математические подходы были применены для решения некоторых задач.

На рис. 1а приведено гладкое соединение двух исходно заданных кубических кривых Безье  $P(u)$  и  $Q(v)$  с непрерывностью  $C^3$  в точках сопряжения. На рис. 1б-г показано влияние дополнительных ограничений на соединительную линию при сохранении непрерывности  $C^3$  в точках сопряжения.

Дополнительные ограничения заданы для  $t_0 = 0,5$  и имеют следующий вид:

$$R^{(0)}(0,5) = (12; 14), \quad (20)$$

$$R^{(1)}(0,5) = (8; 1; 1, 4), \quad (21)$$

$$R^{(2)}(0,5) = (-5; -39). \quad (22)$$

Как следует из анализа рис. 1, дополнительные ограничения могут существенно изменять форму соединительной кривой.

На рис. 2 приводится пример применения предлагаемых методов для задачи скругления угла, образованного двумя кривыми Безье 3-й степени, с сохранением непрерывности  $C^3$  в точках сопряжения исходных кривых со скруглением (соединительной кривой).

### Выводы

В работе представлен математический подход для решения задач гладкого сопряжения кривых Безье в граничных и внутренних точках области определения параметрической переменной. В точке сопряжения сохраняется непрерывность как самой функции, так и всех ее производных до порядка, равного степени заданных кривых Безье.

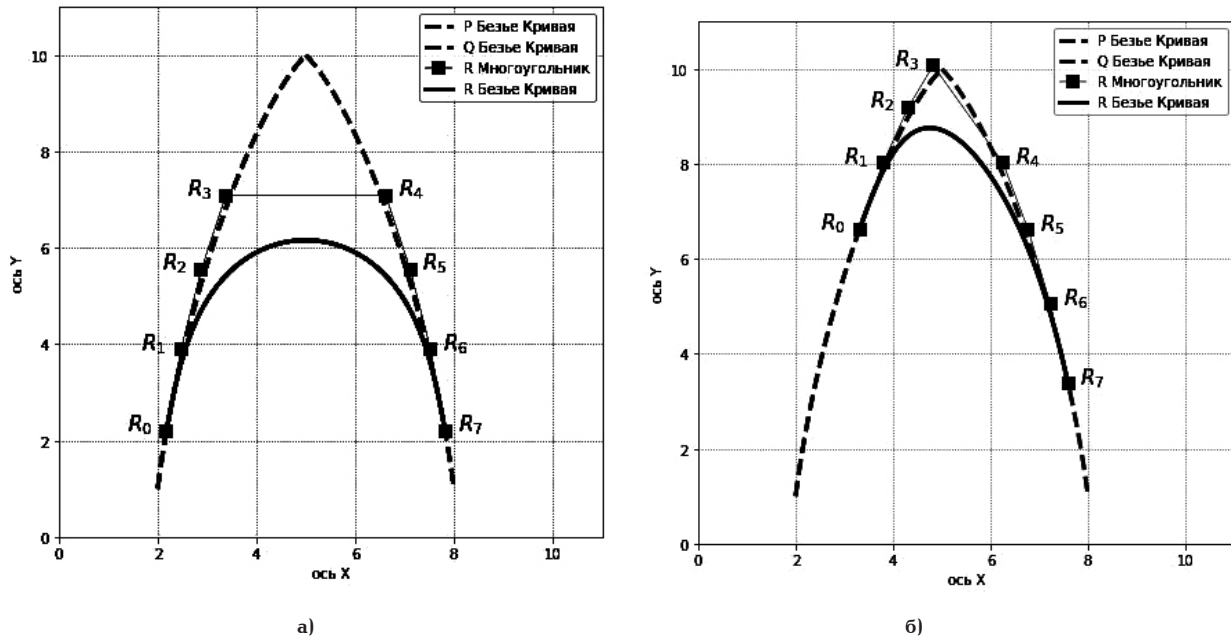


Рис. 2. Скругление угла, образованного кривыми Безье, с сохранением непрерывности  $C^3$ :  
 а — симметричное скругление; б — несимметричное скругление  
 Fig. 2. Curvature of the angle formed by Bezier curves, with preservation of  $C^3$  continuity:  
 а — symmetric curving; б — asymmetric curving

Задача о сопряжении расширяется наложением дополнительных ограничений в виде прохождения сопряженной кривой через заданную точку и задания производных в этой точке, что позволяет управлять формой кривой после сопряжения.

Важным приложением решения задачи о сопряжении во внутренних точках для развития функциональных возможностей САД-систем является возможность скруглять углы, образованные пересечением кривых Безье произвольной степени.

Разработанные алгоритмы могут быть рекомендованы для имплементирования в САД-модуль СПЖЦ «САРУС» [16].

#### Примечания

<sup>1</sup>В работе термины гладкость порядка  $r$  в точке сопряжения и непрерывность  $C^r$  в точке сопряжения понимаются эквивалентными. Гладкость порядка  $r$  и непрерывность  $C^r$  в точке сопряжения означают, что для сопрягаемых параметрических функций в точке сопряжения выполняется равенство производных порядка  $i$ ,  $i = 0, r$ .

#### Список источников/References

1. Chatzivasileiadi A., Wardhana N. M., Jabi W. [et al.]. Characteristics of 3D solid modeling software libraries for non-manifold modeling. *Computer-Aided Design and Applications*. 2019. Vol. 16, no 3. P. 496–518. DOI: 10.14733/cadaps.2019.496-518.
2. Ившин К. С., Башарова А. А. Принципы современного трехмерного моделирования в промышленном дизайне // Архитектон: известия вузов. 2012. № 3 (39). С. 11. EDN: PCUINV.
- Ivshin K. S., Basharova A. F. Printsipy sovremennogo trekhmernogo modelirovaniya v promyshlennom dizayne [Principles of modern three-dimensional modeling in industrial design]. *Arkhitekton: izvestiya vuzov. Architecton: News of Universities*. 2012. No. 39. P. 101–113. EDN: PCUINV. (In Russ.).
3. Короткий В. А. Незаконмерные кривые в инженерной геометрии и компьютерной графике // Научная визуализация. 2022. Т. 14, № 1. С. 1–17. DOI: 10.26583/sv.14.1.01. EDN: RMXYPH.

Короткий В. А. Незаконмерные кривые в инженерной геометрии и компьютерной графике [Irregular curves in engineering geometry and computer graphics]. *Nauchnaya vizualizatsiya. Scientific Visualization*. 2022. Vol. 14, no. 1. P. 1–17. DOI: 10.26583/sv.14.1.01. EDN: RMXYPH. (In Russ.).

4. Панчук К. Л., Мясоедова Т. М. Описание дискретно заданного плоского контура составной линией из дробно-рациональных кривых Безье второго порядка // Программные системы и вычислительные методы. 2019. № 3. С. 49–60. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.3.30637. EDN: SYKZXG.

5. Панчук К. Л., Мясоедова Т. М. Описание дискретно заданного плоского контура составной линией из дробно-рациональных кривых Безье второго порядка [Description of a discretely specified planar contour by a compound line of second-order fractional-rational Bezier curves]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody. Program Systems and Computational Methods*. 2019. No. 3. P. 50–59. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.3.30637. EDN: SYKZXG. (In Russ.).

6. Борисенко В. В. Построение оптимального сплайна Безье // Фундаментальная и прикладная математика. 2016. Т. 21, № 3. С. 57–72.

7. Борисенко В. В. Построение оптимального сплайна Безье [Construction of optimal Bezier splines]. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika. Fundamental and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 21, no. 3. P. 57–72. (In Russ.).

8. Fitter H. N. [et al.] A review on approaches for handling Bezier curves in CAD for Manufacturing // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 97. P. 1155–1166. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.394.

9. Любчинов Е. В., Панчук К. Л. О гладкости стыковки линий и поверхностей при циклографическом моделировании поверхностных форм автомобильных дорог // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Т. 20, № 1. С. 52–62. DOI: 10.14529/build200106. EDN: GCZCOI.

10. Любчинов Е. В., Панчук К. Л. О гладкости стыковки линий и поверхностей при циклографическом моделировании поверхностных форм автомобильных дорог [On the smoothness of compound of the lines and surfaces in cyclographic modeling of surface forms of roads]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. T. 20, No. 1. P. 52–62. DOI: 10.14529/build200106. EDN: GCZCOI.

11. Любчинов Е. В., Панчук К. Л. О гладкости стыковки линий и поверхностей при циклографическом моделировании поверхностных форм автомобильных дорог [On the smoothness of compound of the lines and surfaces in cyclographic modeling of surface forms of roads]. *Nauchnaya vizualizatsiya. Scientific Visualization*. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 1–10. DOI: 10.26583/sv.12.4.01. EDN: RMXYPH.

roads]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2020. Vol. 20, no. 1. P. 52–62. DOI: 10.14529/build200106. EDN: GCZCOI. (In Russ.).

8. Короткий В. А. Конструктивные алгоритмы формирования составных кубических кривых Безье в пространстве и на плоскости // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 10–16. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-10-16. EDN: ZAYBGU.

Korotkiy V. A. Konstruktivnye algoritmy formirovaniya sostavnykh kubicheskikh krivykh Bez'e v prostranstve i na ploskosti [Constructive algorithms for forming compound cubic Bezier curves in space and on plane]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 2 (182). P. 10–16. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-10-16. EDN: ZAYBGU. (In Russ.).

9. Ромакин В. А. Сглаживание ломаных линий составными сплайнами Безье // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2022. Т. 11, № 4. С. 37–50. DOI: 10.14529/cmse220403. EDN: LRUKLU.

Romakin V. A. Sglazhivanie lomanykh liniy sostavnymi splaynami Bez'e [Polyline smoothing with compound Bezier splines]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2022. Vol. 11, no. 4. P. 37–50. DOI: 10.14529/cmse220403. EDN: LRUKLU. (In Russ.).

10. Lu L. Explicit algorithms for multiwise merging of Bézier curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2015. Vol. 278. P. 138–148. DOI: 10.1016/j.cam.2014.10.002.

11. Lu L., Jiang C. An iterative algorithm for G2 multiwise merging of Bézier curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 296. P. 352–361. DOI: 10.1016/j.cam.2015.10.007.

12. Lu L. An explicit method for G3 merging of two Bézier curves. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2014. Vol. 260. P. 421–433. DOI: 10.1016/j.cam.2013.10.030.

13. Zhu P., Wang G. Optimal approximate merging of a pair of Bézier curves with G2-continuity. *Journal of Zhejiang University: SCIENCE A*. 2009. Vol. 10, no. 4. P. 554–561. DOI: 10.1631/jzus. A0820301.

14. Gospodarczyk P., Woźny P. Merging of Bézier curves with box constraints. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 296. P. 265–274. DOI: 10.1016/j.cam.2015.10.005.

15. Ганчук С. Н., Кривошеев О. В., Маврин С. В., Рыжов С. А. Аппроксимация сопряжения кривых Безье с сохранением порядка гладкости и дополнительными ограничениями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Т. 24, № 1. С. 59–69. DOI: 10.14529/build240108. EDN: GSDRNS.

Ganchuk S. N., Krivosheev O. V., Mavrin S. V., Ryzhov S. A. *Approximaciya sopryazheniya krivykh Bez'e s sohraneniem poryadka gladkosti i dopolnitel'nymi ogranicheniyami* [Approximation of Bézier curve conjugation with smoothness order preservation and additional constraints]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2024. Vol. 24, no. 1. P. 59–69. DOI: 10.14529/build240108. EDN: GSDRNS. (In Russ.).

16. Отечественная система полного жизненного цикла «Сарус» обеспечит импортнезависимость и безопасность // САПР и графика. 2023. № 12 (328). С. 68–71. EDN: IEOKZT.

Otechestvennaya sistema polnogo zhiznennogo cikla «Sarus» obespechit importnezavisimost' i bezopasnost' [Domestic full life cycle system «Sarus» will ensure import-independence and safety]. *SAPR i grafika. CAD and Graphics*. 2023. No. 12 (328). P. 68–71. EDN: IEOKZT. (In Russ.).

17. Ганчук С. Н., Старкова А. С., Кривошеев О. В., Маврин С. В., Рыжов С. А. Полностью гладкая аппроксимация

произвольного набора кривых Безье. Часть 1: кривые Безье и постановка задачи // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 11. С. 3–8. DOI: 10.14489/vkit.2024.11.pp.003-008. EDN: FSHVLF.

Ganchuk S. N., Starkova A. S., Krivosheev O. V., Mavrin S. V., Ryzhov S. A. *Polnost'yu gladkaya approximaciya proizvol'nogo nabora krivykh Bez'e. Chast' 1: krivye Bez'e i postanovka zadachi* [Completely smooth approximation of an arbitrary set of Bezier curves. Part 1: Bezier curves and problem statement]. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnykh tekhnologij. Herald of Computer and Information Technologies*. 2024. Vol. 21, no. 11. P. 3–8. DOI: 10.14489/vkit.2024.11.pp.003-008. EDN: FSHVLF. (In Russ.).

18. Ганчук С. Н., Маврин С. В., Семина В. В., Старкова А. С. Гладкое сопряжение двух плоских кривых Безье // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2024. № 1 (54). С. 5–11. DOI: 10.53015/23049235\_2024\_1\_5. EDN: XDIDVX.

Ganchuk S. N., Mavrin S. V., Semina V. V., Starkova A. S. *Gladkoe sopryazhenie dvuh ploskih krivykh Bez'e* [Smooth conjugation of two flat Bezier curves]. *Vestnik Lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Lipetsk State Technical University*. 2024. No. 1 (54). P. 5–11. (In Russ.).

**КРИВОШЕЕВ Олег Викторович**, кандидат технических наук, заместитель директора Российского федерального ядерного центра — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ — ВНИИЭФ) по технологиям полного жизненного цикла, г. Саров; директор Института цифровых технологий, главный конструктор систем полного жизненного цикла, заведующий кафедрой «Цифровые технологии» Саровского физико-технического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Саров.

SPIN-код: 4120-9990

AuthorID (РИНЦ): 1131619

Адрес для переписки: OLVkrivosheev@rosatom.ru

**МАВРИН Сергей Валентинович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров; доцент кафедры «Цифровые технологии» Саровского физико-технического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Саров.

AuthorID (РИНЦ): 604297

Адрес для переписки: s.mavrin@yandex.ru

**СТАРКОВА Алина Сергеевна**, системный аналитик РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров.

Адрес для переписки: a.starkova48@yandex.ru

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

Статья поступила в редакцию 16.12.2024; одобрена после рецензирования 27.01.2025; принята к публикации 29.04.2025.

**KRIVOSHEEV Oleg Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of the Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC — VNIIEF) for Full Life Cycle Technologies, Sarov; Director of the Digital Technologies Institute, Chief Designer

of the Full Life Cycle Systems, Head of the Digital Technologies Department, Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of the National Research Nuclear University "MEPhI", Sarov.

SPIN-code: 4120-9990

AuthorID (RSCI): 1131619

Correspondence address: OLvkrivosheev@rosatom.ru

**MAVRIN Sergey Valentinovich**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, RFNC—VNIIEF, Sarov; Associate Professor of the Digital Technologies Department, Sarov Institute of Physics and Technology — Branch of the National Research Nuclear University "MEPhI", Sarov.

AuthorID (RSCI): 604297

Correspondence address: s.mavrin@yandex.ru

**STARKOVA Alina Sergeevna**, System Analyst, RFNC—VNIIEF, Sarov.

Correspondence address: a.starkova48@yandex.ru

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

The article was submitted 16.12.2024; approved after reviewing 27.01.2025; accepted for publication 29.04.2025.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФРАКЦИОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЫЛИ ПОСЛЕ ОЧИСТКИ В ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ ЦИКЛОННОГО ТИПА И ЕЕ ДООЧИСТКА

В. Ю. Соломин<sup>1</sup>, Л. О. Штриплинг<sup>1</sup>, Вит. Ю. Соломин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск

<sup>2</sup>Детская городская поликлиника № 8, г. Омск

Проблема использования пылеуловителей типа циклон заключается в недостаточной степени очистки пылей малых размеров. Поэтому требуется введение последовательной доочистки для удовлетворения требованиям предельно допустимой концентрации. Обычно расчет остаточной концентрации пыли проводится усредненно, что не дает полного представления о фракционном содержании пыли после очистки и ведет к повышенному проскоку мелких фракций. В данной статье представлен метод расчета фракционной остаточной концентрации пыли для последовательной ее доочистки с применением электрофилтра.

**Ключевые слова:** класс пыли, пылеочистка в циклонах, фракционная очистка, степень очистки пылей, доочистка, очистка в электрофилтре.

**Для цитирования:** Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О., Соломин Вит. Ю. Методика расчета фракционного содержания пыли после очистки в пылеуловителях циклонного типа и ее доочистка // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-35-40. EDN: DHEPAC.



© Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О., Соломин Вит. Ю., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## METHODOLOGY FOR CALCULATING THE FRACTIONAL CONTENT OF DUST AFTER CLEANING IN CYCLONE-TYPE DUST COLLECTORS AND ITS POST-CLEANING

V. Yu. Solomin<sup>1</sup>, L. O. Shtripling<sup>1</sup>, Vit. Yu. Solomin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>2</sup>Children's Municipal Polyclinic No. 8, Omsk, Russia

The problem with using cyclone dust collectors is the insufficient degree of cleaning of small dusts. Therefore, it is necessary to introduce sequential post-cleaning to meet the requirements of the MAC. Usually, the calculation of the residual dust concentration is carried out on average, which does not give a complete picture of the fractional content of dust after cleaning and increased breakthrough of small fractions. This article presents a method for calculating the fractional residual dust concentration for its sequential post-cleaning using an electrostatic precipitator.

**Keywords:** dust class, dust cleaning in cyclones, fractional cleaning, degree of dust cleaning, post-cleaning, cleaning in an electrostatic precipitator.

**For citation:** Solomin V. Yu., Shtripling L. O., Solomin Vit. Yu. Methodology for calculating the fractional content of dust after cleaning in cyclone-type dust collectors and its post-cleaning. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-35-40. EDN: DHEPAC.



© Solomin V. Yu., Shtripling L. O., Solomin Vit. Yu., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Особенности очистки пыли в циклонах

Современное производство включает в себя различные технологические процессы как изготовления продукта, так и процессы утилизации или обезвреживания побочных образований, к которым относится и пылеобразование. Пылеобразование отрицательно воздействует на респираторную и слизистые системы человека. Особенно опасно воздействие осуществляется мелкодисперсными твердыми фракциями, которые не только причиняют механические повреждения слизистых, но и накапливаются в легких, приводя к застойным явлениям и, как следствие, к хроническим заболеваниям [1]. Также наличие пылей в воздухе создает проблемы для техники, связанные с повышенным износом трущихся обработанных смазочными материалами поверхностей из-за накопления в них твердых частиц, затруднением теплоотдачи, утечки и пробоя тока, а при повышенной влажности приводит к созданию трудноудаляемых отложений в воздуховодах с их последующей коррозией. Наиболее часто для пылеулавливания используют пылеуловители типа циклон, которые обеспечивают приемлемую очистку различных видов пылей, относящихся к группам крупной и средней дисперсности с медианным диаметром частиц 15–80 мкм. На сайтах производителей часто указывают проценты очистки от 90 до 95 %, но при этом не уточняют, для именно какого размера пыли актуальны эти значения [2], или совсем не указывают значения степени очистки, лишь снабжая описание областью применения и габаритными характеристиками в зависимости от производительности [3]. Как правило, пыль мультидисперсна и средние значения с высокой степенью очистки не отражают реальную степень обеспыливания для более мелких фракций, которые и являются наиболее опасными с медицинской точки зрения. Поэтому для мелкодисперсных фракций, которые не подвергаются соответствующей очистке в циклоне, требуется доочистка для соответствия нормам предельно допустимой концентрации (ПДК) [4, 5]. Поэтому общепринятый расчет [6] степени очистки в циклоне не дает полного представления об остаточной концентрации пыли по ее фракциям, что затрудняет принятия решения о необходимости последующей доочистки и может привести к дополнительным выбросам загрязняющих веществ в атмосферу. В данной статье представлен метод расчета фракционной остаточной концентрации пыли для последовательной ее доочистки с применением электрофильтра.

#### Анализ пыли и подбор циклона для первичной очистки

В данной работе рассмотрим очистку достаточно крупнодисперсной пыли при помощи пылеуловителя циклонного типа и определим степень ее очистки. Возьмем среднедисперсную пыль антрацита марок АС и АРШ, образованную топкой с механической цепной решеткой. Дисперсность пыли задается ее фракционным составом во всем диапазоне частиц (рис. 1).

В данном случае медианное значение пыли составляет порядка  $d_{50} = 43$  мкм и находится практически на границе среднедисперсной и крупнодисперсной пыли в верхнем диапазоне и среднедисперсной области в нижнем диапазоне согласно ГОСТ 12.2.043–80. Несмотря на то, что крупные фракции пыли составляют более 50 % и будут очищены на 90–99 %, порядка 20 % мел-

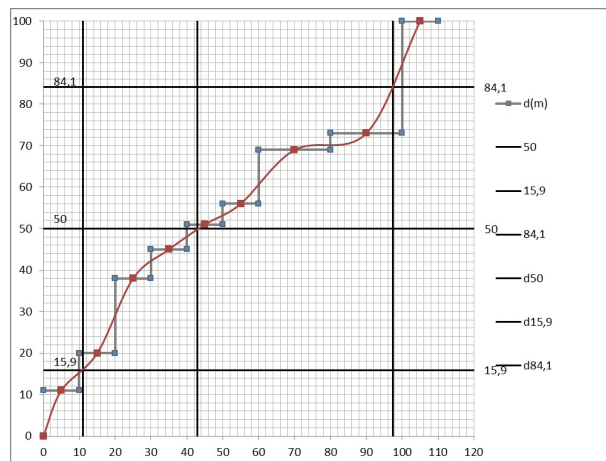


Рис. 1. График распределения общей массы частиц пыли по фракциям  $m(d)$

Fig. 1. Graph of the total mass distribution of dust particles by  $m(d)$  fractions

кодисперсных фракций уйдет в проскок и не позволит очистить пыль до соответствия нормам ПДК. Среднеквадратичное отклонение отражает близость разброса значений фракций относительно их медианного значения и вычисляется при помощи соотношений медианного и граничных значений диаметров пыли [6]. В нашем случае оно будет равно  $\sigma = 3,05$ . Чем более пологий график разброса пыли, тем больше разброс фракций, а значит, и степень очистки при расчете будет завышена относительно реальной.

Данную пыль можно считать достаточно крупной и для ее очистки подойдут циклоны с соотношением [1]

$$\frac{d_{50}}{d_{50}^T} \geq 3,2,$$

где  $d_{50}^T$  – тарированное значение медианной пыли для выбранного циклона.

Опустим процедуру подбора циклона по методу анализа иерархий, она подробно описана в [6]. Будем считать, что в нашем случае оптимальным будет работа циклона СК-ЦН-34 — пылеуловителя для промышленных систем, с длинным конусом, спиральной формы. Степень очистки среды от пылевых частиц с помощью такого агрегата достигает 99 %. При расчете степени очистки для циклонов используется значение диаметра размера частиц тарировочной пыли  $d_{50}^T$  со степенью очистки 50 % с учетом свойств реальной пыли.

При этом диаметр пыли, очищаемый на 50 %, уменьшается при увеличении плотности пыли больше тарировочного значения, которое составляет 1930 кг/м<sup>3</sup>, и уменьшения диаметра циклона менее 600 мм. Таким образом, расчетное значение степени очистки в циклоне будет соответствовать именно для медианного диаметра испытываемой пыли. Фракции пыли более крупного диаметра будут очищаться с большей степенью, а меньшего диаметра — с меньшей степенью.

Произведем расчет по методике [6] и при исходных данных:

— количество очищаемого газа при рабочих условиях  $Q = 5500$  м<sup>3</sup>/ч;

— плотность газа при рабочих условиях  $\rho_r = 0,978$  кг/м<sup>3</sup>;

- динамическая вязкость газа при заданной рабочей температуре  $\mu_r = 2,10 \cdot 10^{-5}$  Па·с ( $t = 80$  °С);
- динамическая вязкость тарировочной пыли при заданной рабочей температуре  $\mu_T = 2,22 \cdot 10^{-5}$  Па·с;
- дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами: медианный размер частиц пыли  $d_{50} = 43$  мкм; параметр среднеквадратичного отклонения  $\sigma = 3,05$ .
- плотность частиц  $\rho_q = 1450$  кг/м<sup>3</sup>;
- тарировочная плотность частиц  $\rho_T = 1930$  кг/м<sup>3</sup>;
- расчетный диаметр циклона  $D = 1$  м;
- тарировочный диаметр циклона  $D_T = 0,6$  м;
- расчетная скорость потока газа в циклоне  $v = 1,94$  м/с;
- тарировочная скорость потока газа в циклоне  $v_{оптум}^T = 3,5$  м/с;
- $d_m$  — характеризует параметр дисперсного состава заданной очищаемой пыли для рабочих условий в зависимости от тарировочных значений для выбранного циклона в соответствии с [6]:

$$d_m = d_{50}^T \sqrt{\frac{D \cdot \rho^T \cdot \mu \cdot v_{оптум}^T}{D_T \cdot \rho_q \cdot \mu_T \cdot v}} = 1,95 \sqrt{\frac{1 \cdot 1930 \cdot 2,10 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 1450 \cdot 2,22 \cdot 10^{-5} \cdot 1,94}} = 3,79 \text{ мкм.}$$

Обратим внимание, что, несмотря на достаточно высокий тарировочный показатель очистки в циклоне, его значение ухудшилось практически в два раза из-за малой плотности испытуемой пыли. Расчет параметра  $x$  выполняем по формуле [6]:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_{50}}{d_m}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma^T + \lg^2 \sigma}} = \frac{\lg\left(\frac{43}{3,79}\right)}{\sqrt{0,308^2 + 0,48^2}} = 1,88.$$

В соответствии со значением функции нормального распределения  $F_0(x)$  определяем коэффициент очистки газа  $\eta$  в центробежном циклоне, выраженный в долях от единицы:

$$\eta = 100 \% \cdot F_0(x).$$

Так как  $x = 1,88$ , то значение функции нормального распределения Гаусса [7] составляет  $F_0 = 0,9699$ . Получаем, соответственно, степень очистки  $\eta = 96,99$  %.

Казалось бы, такая высокая степень очистки достаточно крупнодисперсной пыли будет удовлетворять требованиям предельно допустимой концентрации, а ПДК рабочей зоны данной пыли составит 6 мг/м<sup>3</sup> [8]. По санитарным нормам, воздух, подаваемый после пылеулавливающего оборудования в рабочую зону, должен содержать не более 30 % от ПДК пыли в воздухе, при этом требуемая концентрация составляет

$$\rho_{осм} = \frac{6 \cdot 30}{100} = 1,8 \text{ мг/м}^3.$$

При очистке аэрозолей с высокой концентрацией пыли — более 10 г/м<sup>3</sup> степень очистки воздуха повышается за счет агрегатирования частиц. Допустим, перед циклоном используют дополнительные устройства [7] для повышения концентрации пыли, то примем концентрацию равной  $Z = 12$  г/м<sup>3</sup>.

В связи с повышенной концентрацией пыли пересчитаем величину очистки в циклоне в соответствии с формулой:

$$\eta' = \eta + (100 - \eta) \frac{0,12Z \cdot \log Z}{100} = 96,99 + (100 - 96,99) \frac{0,1212 \cdot \log 12}{100} = 97,04 \%.$$

При увеличении концентрации пыли степень очистки будет подниматься, но незначительно, буквально на доли процента, и уже не будет иметь столь решающего значения. Следовательно, требуемая степень очистки воздуха  $\eta_T$  (в %) составит

$$\eta_T = \frac{100(\rho - \rho_{осм})}{\rho} = \frac{100(12000 - 1,8)}{12000} = 99,985 \%.$$

При степени очистки воздуха циклоном 97,04 % и требуемого значения очистки 99,985 % в соответствии с требованиями ПДК найдем требуемую эффективность доочистки  $x$  из

$$\eta_T = (1 - (1 - \eta') \cdot (1 - x))100\%.$$

тогда требуемая степень доочистки пыли после циклона составит  $x = 99,49$  %.

#### Определение параметров дисперсного состава пыли для доочистки

После подбора и расчета циклона нам стало известно значение степени очистки заданной пыли и значение требуемой доочистки пыли в соответствии с ПДК, которое составило 99,49 %. Для проведения доочистки с заданной степенью необходимо определить новый дисперсный состав пыли после циклона, подобрать пылеочистное оборудование, произвести его расчет.

Методика расчета фракционного содержания пыли после очистки основана на нормировании степени очистки фракций пыли по размерам частиц пыли  $d_j$  на средних значениях фракций относительно полученного значения  $d_m$  выбранного циклона и получения значений очистки всех фракций в соответствии с формулой:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_j}{d_m}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma^T + \lg^2 \sigma}}.$$

В соответствии с табличными значениями распределения Гаусса определяем значение функции нормального распределения  $F_0(x)$  [7] и соответствующий им коэффициент очистки газа  $\eta_i$  согласно табл. 1.

В центробежном циклоне для каждой из заданных фракций  $\Phi_i$ , выраженные в долях от единицы, найдем остаточное содержание пыли в каждой фракции  $\Phi_j$  в соответствии с фракционной степенью очистки каждой, используя формулу:

$$\Phi_j = \frac{\Phi_i(100 - \eta_i)}{100}.$$

Результаты отобразим в табл. 2.

Теперь остаточные значения масс по фракциям образуют новую пыль — нормируем каждую фрак-

Таблица 1. Расчет коэффициента очистки газа по средним значениям фракций

Table 1. Calculation of gas cleaning factor by average fraction values

Размеры частиц пыли $d_p$ на средних значениях фракций	x	Коэффициент очистки газа $\eta$ по средним значениям фракций
5	0,210	58
15	1,041	85
25	1,427	92
35	1,681	95
45	1,872	96
55	2,023	97
70	2,206	98
90	2,396	99
110	2,547	99,5

Таблица 2. Расчет остаточных значений пыли по фракциям

Границы фракций	$\Phi_i, \%$	$\Phi_j, \%$
0 – 10	11	4,62
10 – 20	9	1,35
20 – 30	18	1,44
30 – 40	7	0,35
40 – 50	6	0,24
50 – 60	5	0,15
60 – 80	13	0,26
80 – 100	4	0,04
>100	27	0,135

цию относительно их суммы и получим процентное содержание новых фракций для доочистки  $\Phi_d$ :

$$\Phi_d = \frac{\Phi_j}{\sum \Phi_j} \cdot 100\% .$$

Новый дисперсный состав пыли для доочистки представлен в табл. 3.

На координатной сетке построим график распределения общей массы частиц пыли по фракциям  $m_d(d)$  для доочистки в сравнении с заданной первоначально пылью (рис. 2).

Согласно новому графику пыли для доочистки, медианный диаметр составит:  $d_{50} = 43$  мкм, а среднеквадратическое отклонение диаметров частиц:  $\sigma = 4,55$ . При размещении данных на классификационную номограмму пылей определяем группу дисперсной пыли по ГОСТ 12.2.043–80. Данная пыль относится к четвертой классификационной группе: мелкодисперсная пыль. При этом первоначальный образец пыли был на границе средней и крупнодисперсной пыли, что говорит о том, что очистка в циклоне может повысить класс пыли не более чем на одну ступень, но это, конечно же, недостаточно, для полноценной ее очистки.

Таблица 3. Дисперсный состав пыли после очистки циклоном

Размеры частицы пыли $d_p$ на границах фракций, мкм	0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 80	80 – 100	>100
Распределение общей массы частиц пыли по фракциям после очистки в циклоне, $\Phi_d, \%$	53,81	15,73	16,77	4,08	2,80	1,75	3,03	0,47	1,57
Массовая доля частиц пыли для фракций менее заданного размера для доочистки, $m_d(d), \%$	53,81	69,54	86,31	90,39	93,19	94,93	97,96	98,43	100

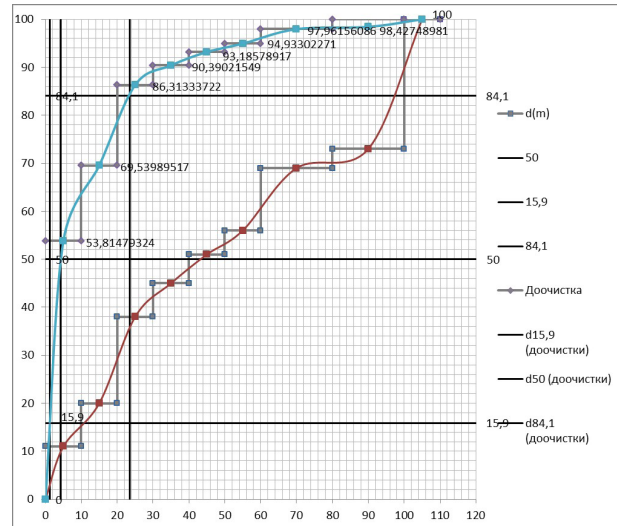


Рис. 2. График распределения общей массы частиц пыли по фракциям  $\Phi_d m_d(d)$  для доочистки в сравнении с первичной пылью

Fig. 2. Graph of the total mass distribution of dust particles by  $\Phi_d m_d(d)$  fractions for post-cleaning compared to primary dusts

### Доочистка при помощи электрофильтра

Для доочистки можно использовать различные типы пылеуловителей с возможностью фильтрации мелкодисперсных пылей. Предпочтение отдадим таким моделям очистки, расчет которых позволяет наглядно продемонстрировать доочистку с требуемой степенью для удовлетворения условиям ПДК.

В данном случае будем использовать электрическую фильтрацию как эффективную технологию очистки, основанной на зарядке взвешенных частиц и их осаждения на осадительных электродах. В некоторых работах описывается совместная работа циклонов с последующей или предварительной фильтрацией электрофильтрами или тканевыми фильтрами, но не прорабатывается методология доочистки, а лишь указывается на такую конструктивную возможность и возможные проблемы их использования в совмещенном корпусе [5, 9, 10]. Для примера рассмотрим расчет трубчатого электрофильтра типа КТ-9 для очистки пыли  $d = 4,3$  мкм с производительностью  $Q = 5500$  м<sup>3</sup>/ч (допустим, что потери отсутствуют).

Характеристика электрофильтра:  $R = 120$  мм;  $U = 25$  кВ;  $w_r = 1,1$  м/с;  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $\epsilon = 15$ ;  $\eta = 0,9601$ .

Рассчитываем требуемую площадь активного сечения электрофильтра:

$$S = \frac{Q}{w_r} = \frac{1,572}{1,1} = 1,388 \text{ м}^2.$$

Определяем напряженность электрического поля:

$$E = \frac{U}{R} = \frac{25 \cdot 10^3}{0,12} = 208333,3 \text{ В/м,}$$

скорость осаждения (дрейфа) частиц:

$$w_o = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot d \cdot E^2}{(\epsilon + 2)\mu} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 15,4 \cdot 3 \cdot 208333,3^2}{(15 + 2) \cdot 18 \cdot 10^{-6}} = 0,081 \text{ м/с,}$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

Также определяем длину электрофилтра и степень очистки по формулам [10]:

$$L = \frac{R \cdot w_r}{2 \cdot w_o} \ln \frac{1}{1 - \eta},$$

где  $\eta$  — требуемая эффективность очистки, равная 0,9949,

$$L = \frac{0,12 \cdot 1}{2 \cdot 0,081} \ln \frac{1}{1 - 0,9949} = 4,302 \text{ м.}$$

Ожидаемая эффективность очистки [11] рассчитывается при найденной длине в 5,28

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{2 \cdot w_o \cdot L}{R \cdot w_r}\right] = 1 - \exp\left[-\frac{2 \cdot 0,081 \cdot 4,302}{0,12 \cdot 1}\right] = 0,9949 = 99,49 \text{ \%}$$

Итоговая формула степени очистки, в нашем случае очистка производится в системе последовательно соединённых аппаратов (циклон и электрофилтр), будет выглядеть следующим образом:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_c) \cdot (1 - \eta_s),$$

где  $\eta_c$ ,  $\eta_s$  — степень очистки циклона и электрофилтра соответственно,

$$\eta = 1 - (1 - 0,9704) \cdot (1 - 0,9949) = 99,985 = 99,985 \text{ \%}$$

которая будет удовлетворять требованиям ПДК для рабочей зоны.

### Выводы

На предприятиях используется различное газоочистное оборудование для очистки промышленных выбросов в атмосферу. Использование циклонов приемлемо в случаях, когда нет необходимости удовлетворять требованиям ПДК или производить очистку крупнодисперсных пылей. При введении ограничений по концентрации пыли после очистки целесообразна комплексная очистка, включающая две ступени как минимум. В работе представлен метод определения дисперсионного состава пыли после очистки в циклоне для последовательной ее доочистки в более эффективных аппаратах. Разработанная методика позволяет получить полное представление об остаточной концентрации пыли по ее фракциям после очистки в циклонах, что облегчает принятие решения о необходимости последующей доочистки. В данной статье представлен метод расчета фракционной остаточной концентрации на примере среднедисперсной пыли антрацита марок АС и АРШ, образованной топкой с механи-

ческой цепной решеткой для последовательной ее доочистки с применением электрофилтра. Проведенное исследование показывает, что очистка в циклоне может повысить класс пыли не более чем на одну ступень, что недостаточно для полноценной ее очистки согласно требованиям ПДК.

Статья будет полезна инженерам, экологам и аспирантам, занимающимся исследованием и проектированием систем очистки для удовлетворения требованиям в области охраны окружающей среды и охраны труда.

### Список источников/ References

1. Соломин В. Ю., Белькова С. В., Соломин Вит. Ю. Подбор пылеочистительного оборудования типа циклон для металлообрабатывающих производств при помощи метода анализа иерархий // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-46-52. EDN: XBFXFS.
2. Solomin V. Yu., Bel'kova S. V., Solomin Vit. Yu. Podbor pyleochohistitel'nogo oborudovaniya tipa tsiklon dlya metalloobrabatyvayushchikh proizvodstv pri pomoshchi metoda analiza iyerarkhiy [Selection of dust cleaning equipment such as cyclone for metalworking industries using the hierarchy analysis method]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-46-52. EDN: XBFXFS. (In Russ.).
3. Циклон ЦН-15-200х1УП. URL: <https://saem.su/ciklon-cn-15-200h1up> (дата обращения: 30.10.2024).
4. Tsiklon TSN-15-200x1UP [Cyclone CN-15-200x1UP]. URL: <https://saem.su/ciklon-cn-15-200h1up> (accessed: 30.10.2024). (In Russ.).
5. Циклоны типа ЦН-15. URL: <https://www.folter.ru/catalog/vozdushnye-filtry-i-pyleuloviteli-folter-dlya-sistem-aspiracii/cn-15/> (дата обращения: 30.10.2024).
6. Tsiklony tipa TsN-15 [Cyclones of type CN-15]. URL: <https://www.folter.ru/catalog/vozdushnye-filtry-i-pyleuloviteli-folter-dlya-sistem-aspiracii/cn-15/> (accessed: 30.10.2024). (In Russ.).
7. Орлов С. М. Энергосберегающие технологии при двухступенчатой схеме очистки газов (циклон — аппарат тонкой очистки) // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения. 2018. № 1. С. 55–60. EDN: XNOOPB.
8. Orlov S. M. Energoberegayushchiye tekhnologii pri dvukhstupenchatoy skheme ochistki gazov (tsiklon — apparat tonkoy ochistki) [Energy saving technology in a two-step purification schemes (cyclone — apparatus thin clearing)]. *Nauchno-tekhnicheskiye Problemy Sovershenstvovaniya i Razvitiya Sistem Gazoenergostonabzheniya*. 2018. No. 1. P. 55–60. EDN: XNOOPB. (In Russ.).
9. Пат. 2251445 С2 Российская Федерация, МПК В01Д 46/00, В01Д 46/26, В04С 9/00. Фильтр-циклон для очистки газов / Панов С. Ю., Энтин С. В., Анжеуров Н. М. [и др.]. № 2003122539/15; заявл. 18.07.2003; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13. EDN: MMIQQM.
10. Patent 2251445 C2 Russian Federation, IPC B01D 46/00, B01D 46/26, B04C 9/00. Fil'tr-tsiklon dlya ochistki gazov [Cyclonic Filter] / Panov S. Yu., Entin S. V., Anzheurov N. M. [et al.]. No. 2003122539/15. EDN: MMIQQM. (In Russ.).
11. Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О. Использование метода анализа иерархий при выборе пылеочистительного оборудования литейного производства // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81. EDN: NTLDSH.
12. Solomin V. Yu., Shtripling L. O. Ispol'zovaniye metoda analiza iyerarkhiy pri vybore pyleochohistitel'nogo oborudovaniya liteynogo proizvodstva [Using the hierarchy analysis method when choosing dust cleaning equipment for foundry]. Omskiy nauchnyy vestnik.

*Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81. EDN: NTLDSH. (In Russ.).

7. Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков В. И. [и др.]. Справочник по пыли- и золоулавливанию. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

Birger M. I., Val'dberg A. Yu., Myagkov V. I. [et al.]. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu [Handbook of dust and ash collection]. 2nd ed., revised and with supplement. Moscow, 1983. 312 p. (In Russ.).

8. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 № 76 (ред. от 29.06.2017) «О введении в действие ГН 2.2.5.1313-03» (вместе с «ГН 2.2.5.1313-03. Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003) (Зарегистрировано в Минюсте России 19.05.2003 № 4568). Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс».

Postanovleniye Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 30.04.2003 № 76 (red. ot 29.06.2017) «O vvedenii v deystviye GN 2.2.5.1313-03» (vmeste s «GN 2.2.5.1313-03. Khimicheskiye faktory proizvodstvennoy sredy. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) vrednykh veshchestv v vozdukhke rabochey zony. Gigiyenicheskiye normativy», utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 27.04.2003) (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 19.05.2003 № 4568) [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 30.04.2003 No. 76 (as amended on 29.06.2017) «On the introduction of GN 2.2.5.1313-03» (together with "GN 2.2.5.1313-03. Chemical factors of the production environment. Maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in the air of the working area. Hygienic standards", approved. by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 27.04.2003) (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 19.05.2003 No. 4568). Available at Consultant Plus. (In Russ.).

9. Катин В. Д., Долгов Р. В. Разработка новых конструкций циклонов для очистки газов котельных на предприятиях железнодорожного транспорта // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. № 4 (17). С. 23–25. EDN YZCOHB.

Katin V. D., Dolgov R. V. Razrabotka novykh konstruktsiy tsiklonov dlya ochistki gazov kotel'nykh na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta [New cyclones development to clean boiler compartments' gas at railway transport enterprises]. Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. *Transport of the Asia-Pacific Region Scientific Journal*. 2018. No. 4 (17). P. 23–25. EDN: YZCOHB. (In Russ.).

10. Орлов С. М., Романенко Б. Р. Исследование баланса сил в выхлопной трубе циклона // Строитель Донбасса. 2021. № 3 (16). С. 21–25. EDN: NEVCSB.

Orlov S. M., Romanenko B. R. Issledovaniye balansa sil v vykhlopnoy trube tsyklona [Balance of forces in the exhaust pipe of a cyclone research]. Stroitel' Donbassa. *The Builder of Donbass*. 2021. No. 3 (16). P. 21–25. EDN: NEVCSB. (In Russ.).

11. Ерошенко В. Г. Повышение эффективности работы электрофильтров при очистке промышленных газов // Экология и промышленность. 2018. № 3-4 (56-57). С. 36–39. EDN: YWBXML.

Eroshenko, V. G. Povysheniye effektivnosti raboty elektrofil'trov pri ochistke promyshlennykh gazov [Increase of electrostatic precipitator efficiency during industrial gases purification]. Ekologiya i promyshlennost'. *Ecology and Industry*. 2018. No. 3–4 (56–57). P. 36–39. EDN: YWBXML. (In Russ.).

**СОЛОМИН Вячеслав Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2972-5037

AuthorID (РИНЦ): 440725

Адрес для переписки: v\_solomin@mail.ru

**ШТРИПЛИНГ Лев Оттович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

**СОЛОМИН Виталий Юрьевич**, кандидат медицинских наук, консультативно-диагностическое отделение Детской городской поликлиники № 8, г. Омск.

SPIN-код: 7420-4564

AuthorID (РИНЦ): 440722

Адрес для переписки: youjian@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 10.12.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

**SOLOMIN Vyacheslav Yuryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Industrial Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2972-5037

AuthorID (RSCI): 440725

Correspondence address: v\_solomin@mail.ru

**SHTRIPLING Lev Ottovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

**SOLOMIN Vitaliy Yuryevich**, Candidate of Medical Sciences, Consultative and Diagnostic Department of the Children's Municipal Polyclinic No. 8, Omsk.

SPIN-code: 7420-4564

AuthorID (RSCI): 440722

Correspondence address: youjian@mail.ru

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

The article was submitted 10.12.2024; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 29.04.2025.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н. В. Бобков, А. А. Федоров, Н. С. Артеменко

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье предлагается методика моделирования процессов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки методом конечных элементов. Описаны основные подходы к расчету тепловых полей, анализу дефектного слоя и фазовых превращений, возникающих при обработке материалов. Рассмотрена возможность использования модели для прогнозирования глубины дефектного слоя и топографии обработанной поверхности. Предложенная методика позволяет оценивать влияние параметров обработки на качество заготовок из титановых и циркониевых сплавов. Методика может применяться в авиационной и космической промышленности, медицине, судостроении и других отраслях, где требуется высокая точность обработки сложных деталей.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, моделирование, конечные элементы, дефектный слой, параметры обработки, распространение тепловой энергии, тугоплавкие металлы.

**Для цитирования:** Бобков Н. В., Федоров А. А., Артеменко Н. С. Моделирование процесса проволочно-вырезной электроэрозионной обработки методом конечных элементов // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 41–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-41-48. EDN: UMOBKZ.



© Бобков Н. В., Федоров А. А., Артеменко Н. С., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## MODELING OF WIRE-CUT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, N. S. Artemenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The paper proposes a methodology for modeling of wire-cut electrical discharge machining processes by finite element method. The authors describe the main approaches to calculating thermal fields by analyzing the recast layer and phase transformations occurring during material processing. Moreover, the article considers the feasibility of using the model to predict the depth of the recast layer and the topography of the processed surface. The proposed methodology allows estimating the influence of machining parameters on the quality of titanium and zirconium alloy blanks. The methodology can be applied in aviation and space industry, medicine, shipbuilding and other industries where high precision machining of complex parts is required.

**Keywords:** electrical discharge machining, modeling, finite elements, defect layer, machining parameters, heat energy distribution, refractory metals.

**For citation:** Bobkov N. V., Fedorov A. A., Artemenko N. S. Modeling of wire-cut electrical discharge machining process by finite element method. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 41–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-41-48. EDN: UMOBKZ.



© Bobkov N. V., Fedorov A. A., Artemenko N. S. 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Введение

В 1940-х гг. Борис Романович Лазаренко со своей супругой Наталией Иоасафовной Лазаренко [1] исследовали снижение электроконтактной корро-

зии (электрической коррозии) и обнаружили, что она неизбежна. Было решено применить принцип электрокоррозии в производственной сфере, а также разработать контролируемый процесс об-

работки труднообрабатываемых материалов, то есть использование контролируемых условий разряда для прецизионной обработки [2]. Технология электроэрозионной обработки позволяет обрабатывать материалы высокой твердости сложной формы. Впервые она была использована при обработке аэрокосмических сплавов и производстве пресс-форм в 1950-х гг. Повышение производительности, а также точное и быстрое изготовление деталей сложной формы имеют решающее значение.

В процессе электроэрозионной обработки искра вызывает испарение и плавление материала двух электродов (инструмента и заготовки) в узком пространстве, заполненном диэлектрической жидкостью, в течение нескольких микросекунд. Материалы в зоне испарения удаляются непосредственно путем испарения, а большая часть материалов в зоне плавления отделяется от матричных материалов под высоким давлением нагнетательного канала. Наблюдение процесса и количественная оценка механизма удаления материала с помощью экспериментов при чрезвычайно сложных физических свойствах электрической искры (плазмы) в процессе разряда затруднительны [3, 4]. Таким образом, большинство исследователей разрабатывают модели процесса электроэрозионной обработки для точного прогнозирования формы кратера, топографии поверхности, скорости удаления материала, дефектного слоя и скорости износа инструмента.

В последние годы развиваются молекулярно-динамические и полевые модели. Ранние подходы метода конечных элементов (МКЭ) ограничивались 2-мерными моделями теплового потока с использованием полуконечного [5–7] или бесконечного [8] цилиндрического электрода. Гипотезы включали цилиндрическую искровую плазму [5, 6], дисковый [5, 6] или точечный источник тепла [9], а также постоянный источник [5, 8] и радиус теплового потока [10, 11], часто с постоянными теплофизическими свойствами [8, 12].

Salah и Ghanem [13] разработали модель теплопереноса, где тепловые источники распределяются по Гауссу, а теплопроводность связана с температурой, повышая точность моделирования [14]. МКЭ используется для анализа топографии поверхности при непрерывных разрядах, распределения энергии [15, 16], радиуса канала разряда [17] и движения плазмы [18]. Современные модели также охватывают ультразвуковую обработку, магнитные поля и вспомогательные электроды для керамических материалов [19–23].

Молекулярно-динамическое моделирование (МД) позволяет изучать характеристики материалов на атомарном уровне. Yang et al. [24] показали, что удаление материала связано с испарением и взрывом пузырьков перегретого металла. Yue [25] создал 3D МД-модель для анализа формирования дефектов в многокристаллической меди. Zhang [26] предложил гибридную модель, совмещающую МД и двухтемпературный подход, для изучения плавления материала в нано-электроэрозионной обработке (нано-ЭЭО). Данные модели также исследуют движение диэлектрика [27], транспорт мусора и пузырьков [28], а также износ электрода [29].

Анализ показывает, что подходы к моделированию электроэрозионной обработки делятся на три основные группы. Их распределение показано на рис. 1 [30].

Тип тепла в моделях электроэрозионной обработки (ЭЭО) играет ключевую роль. В работе [8]



Рис. 1. Сравнение трех типов моделирования по количеству опубликованных работ [38]  
Fig. 1. Comparison of the three modeling types by number of published papers [38]

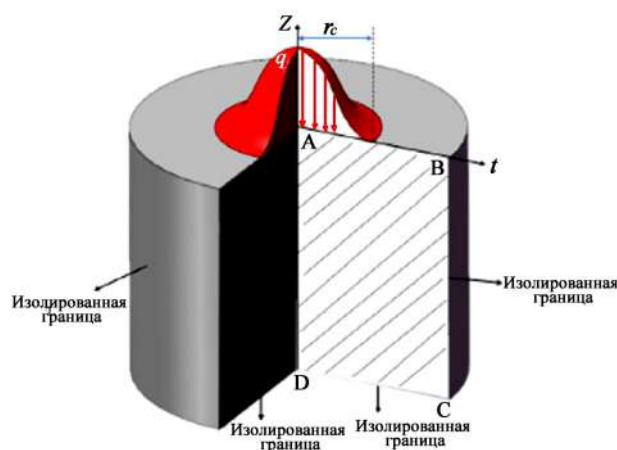


Рис. 2. Гауссово распределение тепла [38]  
Fig. 2. Gaussian heat distribution [38]

предложен диск как источник тепла для катода с изоляцией внешней поверхности, активный в течение разрядов. Модель имела ограничение по длине электрода вдоль оси  $Z$ , снижая точность расчетов. В исследованиях [5, 13] использовался диск как тепловой источник для нагрева обоих электродов, но недостаточная адаптация к ЭЭО привела к ошибкам из-за низкой теплопередачи [6].

Параметры разряда (ток, напряжение) и свойства материалов изучались для анализа формы воронки и удаления материала. Модели также рассматривали влияние импульса тока на износ электрода, предлагая оптимальные формы для его минимизации [10].

Erden и Kaftanoglu [9] представили модель с равномерно распределенными точечными источниками, которая оказалась менее точной. Dibitonto и соавторы [31] использовали точечный источник на катоде и дисковый на аноде, определив распределение температуры. Каждый импульс трактовался как искра с долей энергии разряда 0,183, что согласовалось с экспериментальными данными.

Eubank и соавторы [32] показали, что гауссово распределение тепла более реалистично, чем дисковый источник, разработав модели для анода, катода и цилиндрической плазмы (рис. 2).

На основе гауссового источника тепла [33] разработана модель конечно-элементная модель (КЭМ) для предсказания распределения температуры катодного пятна разряда при одиночном разряде в ЭЭО. Моделирование визуализировало динами-

ческое распределение температуры в околошовной зоне, объясняя механизм удаления материала. В работе [34] представлена модель КЭМ с гауссовым источником тепла для анализа эффектов множественных разрядов. Экспериментальные данные показали, что эта модель предсказывает скорость удаления материала (СУМ) и шероховатость поверхности с ошибкой менее 6 %. Многоискровая модель с гауссовым источником тепла [35] продемонстрировала точность предсказаний шероховатости поверхности с ошибкой от 1,5 до 18 % при различных значениях тока и времени импульса.

Смешанное моделирование ЭЭО [36] использовало гауссово распределение тепла для расчёта температуры и оценки СУМ на основе температурных профилей. Эксперименты подтвердили высокую согласованность теоретических и практических результатов. Sundriyal и другие [37] предложили модель КЭМ для сухой ЭЭО, интегрированную с гауссовым тепловым воздействием, которая предсказывала скорость удаления материала с ошибкой менее 30 %, подтверждённой экспериментально.

Хотя для моделирования ЭЭО применяются КЭМ, молекулярно-динамические модели и модели потока имеют свои преимущества и ограничения. Наиболее популярны модели с цилиндрическим тепловым источником, однако перспективными считаются модели с гауссовым распределением. Несмотря на их высокую точность, они требуют значительных вычислительных ресурсов и сложны в настройке ограничений, а расчёты занимают значительно больше времени.

Как видно из литературного обзора, моделированию процессов, происходящих во время электроэрозионной обработки, уделено большое внимание различными исследовательскими коллективами по всему миру.

В каждом исследовании отмечается зависимость скорости обработки и качества поверхностного слоя от режимов обработки. При этом, говоря о качестве поверхностного слоя, подразумевается его чистота, а точнее наличие в нем материала электрода-инструмента и диэлектрической среды, а также различных фазовых превращений и трещинообразования.

Современные требования к точности, качеству поверхности и структурной однородности деталей, изготавливаемых из тугоплавких и труднообрабатываемых сплавов, таких как титановые и циркониевые, обуславливают необходимость глубокого понимания процессов, происходящих в зоне воздействия импульсной электроэрозии. В связи с усложнением геометрии деталей, ужесточением стандартов на шероховатость и требованиями по минимизации дефектных слоёв, традиционные экспериментальные подходы к исследованию процессов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПЭЭО) оказываются недостаточными. Литературный обзор свидетельствует о высоком уровне интереса к численному моделированию ЭЭО, в частности к использованию метода конечных элементов, как к инструменту, позволяющему количественно предсказывать термические и фазовые изменения в зоне обработки, а также управлять режимами для достижения требуемого качества поверхности. Особую актуальность представляет разработка модели, способной отразить влияние режимных параметров на формирование дефектного слоя и фазовых превращений в микрообъёме материала, что крайне важно для критически нагруженных изделий, при-

меняемых в аэрокосмической, медицинской и судостроительной отраслях.

Целью настоящей работы является разработка и реализация методики численного моделирования процесса ПЭЭО с применением метода конечных элементов для оценки глубины термического воздействия, дефектного слоя и фазовых превращений в титановых и циркониевых сплавах, а также определение закономерностей влияния режимных параметров (времени импульса) на морфологию зоны обработки.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие задачи:

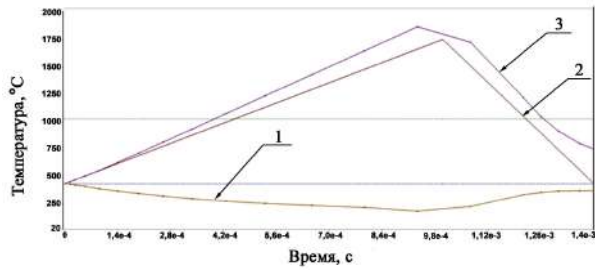
1. Провести аналитический обзор современных подходов к моделированию процессов ЭЭО с акцентом на использование МКЭ, молекулярно-динамических моделей и моделей распределения тепла.
2. Разработать конечно-элементную модель импульсного теплового воздействия, реализованную в программной среде Ansys 21 с применением модуля Transient Thermal.
3. Смоделировать тепловое поведение титановой и циркониевой заготовок при различной длительности электрического разряда, учитывая фазовые переходы и температурные градиенты.
4. Оценить глубину расплавленного и дефектного слоев, а также зоны фазовых превращений в зависимости от времени импульса.
5. Провести сопоставление результатов моделирования с данными, известными из экспериментов и литературы, с целью верификации адекватности модели.
6. Обосновать практическое применение полученных данных для оптимизации режимов ПЭЭО с целью повышения качества обработки и минимизации структурных нарушений.

### Материалы и методы исследования

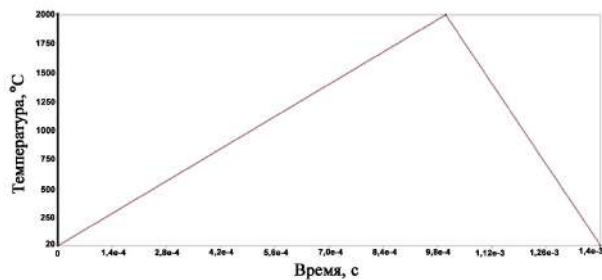
Для теоретической оценки глубины залегания дефектного слоя и трещинообразования, а также фазовых превращений в поверхностном слое титановых и циркониевых заготовок, был произведен расчет с использованием программного продукта Ansys V.21. Главной задачей теоретических исследований был расчет глубины распространения температур, для определения глубины на которой возможно образование дефектов, таких как трещины и фазовые превращения. Для выполнения расчета был выбран модуль «Transient Thermal», позволяющий производить вычисления, основываясь на объемном распределении тепла в глубь заготовки, исходя из теплопроводности материала. Данный модуль требует наличие библиотеки материалов, подготовленную геометрию детали или всей сборки, разбиение каждой имеющейся детали на сетку конечных элементов и установки, в которых задаются ограничения. Тело заготовки представлено кубом 5×5×5 мм.

На первом этапе необходимо определить, какой материал будет выбран для каждого элемента. В первом приближении из библиотеки материалов для диэлектрической жидкости выбирается «Water liquid», для материала проволочного электрода-инструмента — «Copper Alloy NL», для циркониевого образца — «Zr», а для титанового — «Ti-6Al-4V».

На втором этапе необходимо создать геометрию каждого тела, входящего в расчет. Для этого изображается тело образца в виде параллелепипеда, также в виде параллелепипеда изображается диэлектрическая жидкость, в которую помещается цилиндриче-



**Рис. 3. Задание начальных параметров:**  
 1 — график значений для воды;  
 2 — график значений для тела, эмитирующего электрический разряд;  
 3 — график реакции окружающей среды  
**Fig. 3. Setting initial parameters:**  
 1 — graph of water values; 2 — graph of electric discharge emitting body values; 3 — graph of environmental response



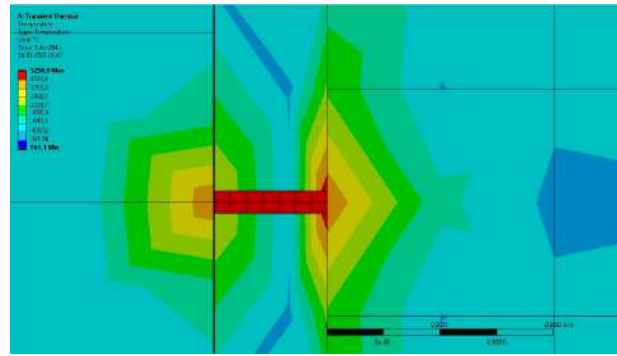
**Рис. 4. Задание времени действия температур**  
**Fig. 4. Setting the time of action for temperatures**

ское тело (электрод-инструмент), диаметром 0,2 мм и длиной 5 мм, а между ним и заготовкой изображается цилиндр диаметром 0,002 мм и длиной 0,05 мм, имитирующий разряд.

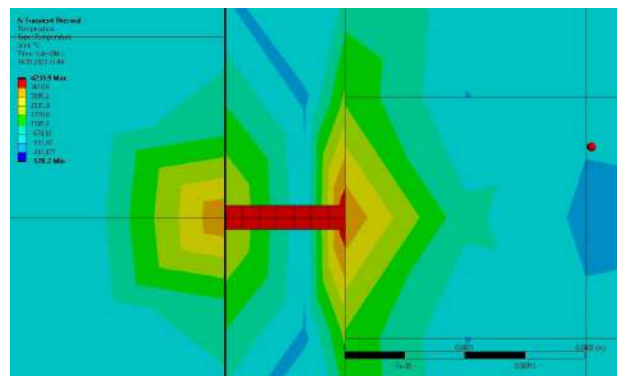
Следующим шагом необходимо создать сетку конечных элементов, а перед этим необходимо выбрать ее размер для каждого элемента. Чем больше ячейка сетки, тем быстрее и менее требовательным к ресурсам будет расчет, однако при слишком крупной сетке расчет будет менее точным. Учитывая вышесказанное, была выбрана адаптивная сетка, принимающая меньший размер в местах контакта и более крупный — в остальных местах.

Далее необходимо задать граничные условия, при которых тела взаимодействуют друг с другом и какие начальные температуры имело каждое тело. Диэлектрическая жидкость задается как дистиллированная вода, которая имеет постоянную температуру 20 °С и взаимодействует с другими телами за счет конвекции (рис. 3).

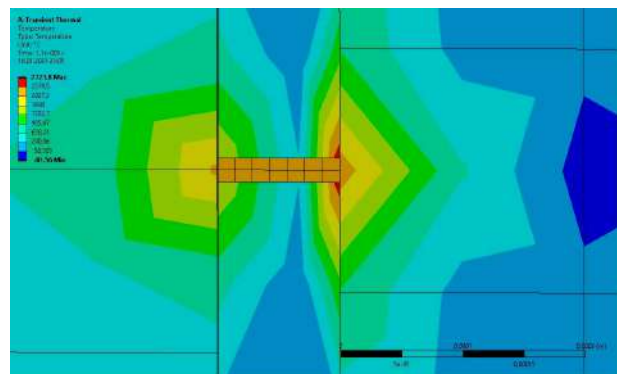
Электрический разряд, проходящий от электрода-инструмента к циркониевой заготовке, представлен твердым телом, которое мгновенно нагревается до температуры 5000 °С и держит температуру в течение 3 мкс для первого прохода, для второго — 2,5 мкс, для третьего — 2,5 мкс и для четвертого — 1,5 мкс, передает тепло за счет контакта с поверхностью заготовки с помощью конвекции и излучения. Температура в 5000 °С обусловлена воздействием электрического импульса высокой мощности. При таком импульсе сила тока порядка 10 А и напряжение около 45 В. Значение температуры принято одинаковым для всех материалов и при разном времени воздействия. На рис. 4 показан пример задания температуры для четвертого прохода.



**Рис. 5. Визуализация распространения тепловых волн, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 3 мкс (титановый сплав)**  
**Fig. 5. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 3 mks (titanium alloy)**



**Рис. 6. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2,5 мкс (титановый сплав)**  
**Fig. 6. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2,5 mks (titanium alloy)**



**Рис. 7. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2 мкс (титановый сплав)**  
**Fig. 7. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2 mks (titanium alloy)**

Полученные результаты расчетов для титановых образцов отражены на рис. 5–8, где в разрезе оранжевым цветом отмечено нагретое тело (имитирующее разряд); слева от него — электрод-инструмент; справа — заготовка.

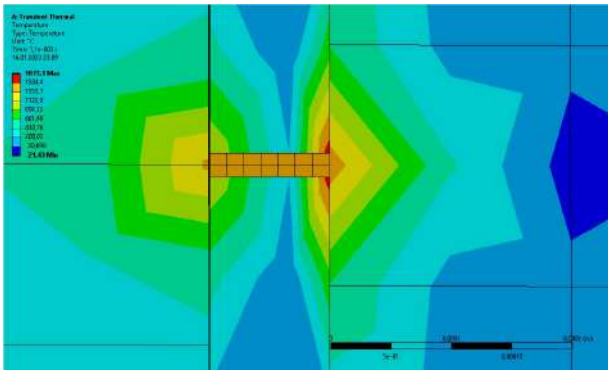


Рис. 8. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 1,5 мкс (титановый сплав)

Fig. 8. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 1,5 mks (titanium alloy)

Результаты расчёта показывают, что температура, необходимая для начала плавления титановых сплавов (примерно 1670 °С), не проникает на глубину более 100 мкм от поверхности. Это свидетельствует о том, что зона расплавленного материала, а следовательно, и зона первичного эрозионного разрушения ограничена этим значением. Принимая во внимание наличие переходной области между расплавленной и твердой фазой, а также возможное термическое влияние на подлежащие слои, можно утверждать, что глубина потенциального дефектного слоя, включающего микротрещины, переохлаждённые структуры или аморфные включения, не превышает 350 мкм от предельной границы зоны нерасплавленного материала или около 150 мкм от исходной поверхности детали до начала обработки.

Кроме того, в модели отслежено распространение температур, соответствующих пороговым значениям для фазовых превращений в титановых сплавах, например, температуры  $\alpha \rightarrow \beta$  перехода (около 880 °С). Данная изотерма не распространяется в глубь заготовки на расстояние более 135 мкм от исходной внешней поверхности. Это означает, что структурные изменения, такие как перекристаллизация, рост  $\beta$ -фазы или образование метастабильных фазовых состояний, могут возникать только в пределах этой глубины. С учётом удаления поверхностного слоя после обработки (например, шлифованием или травлением) глубина реального воздействия фазовых превращений на готовую деталь составит не более 35 мкм.

Таким образом, полученные данные позволяют не только количественно оценить глубину температурного воздействия, но и прогнозировать характер термически индуцированных структурных изменений в материале. Эти результаты имеют практическую значимость при разработке режимов электроэрозионной обработки, направленных на минимизацию дефектов и обеспечение требуемых механических и эксплуатационных характеристик обработанных деталей. Результаты расчетов для циркониевых образцов отражены на рис. 9–12.

В случае моделирования ЭЭО циркониевых сплавов расчётные данные демонстрируют существенно более локализованный характер теплового воздействия по сравнению с титаном. Температурное поле в зоне действия разряда характеризуется

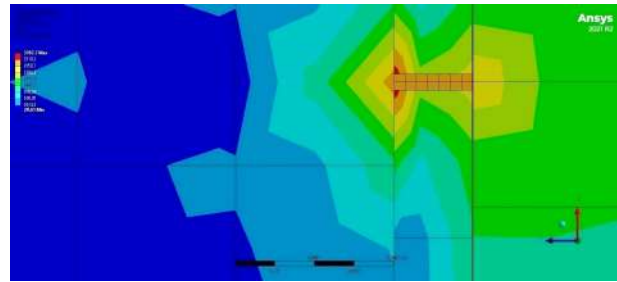


Рис. 9. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 3 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 9. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 3 mks (zirconium alloy)

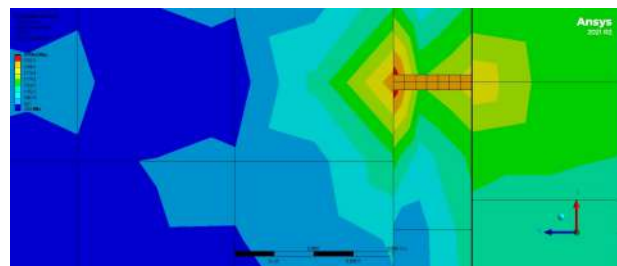


Рис. 10. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2,5 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 10. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2,5 mks (zirconium alloy)

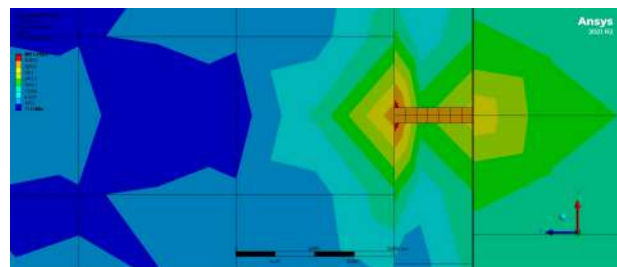


Рис. 11. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 11. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2 mks (zirconium alloy)

высокой концентрацией энергии в приповерхностных слоях материала, при этом глубина распространения температур, соответствующих порогу плавления циркония (1855 °С), ограничивается примерно 25 мкм. Такой результат указывает на крайне малую толщину зоны расплава, что является следствием как высокой температурной чувствительности циркония, так и особенностей выбранного режима импульсного нагрева (on — 2,5 мкс; off — 11 мкс; sv — 55 В). При таких условиях интенсивный тепловой импульс не сопровождается достаточным временем для глубокого распространения энергии в объёме материала.

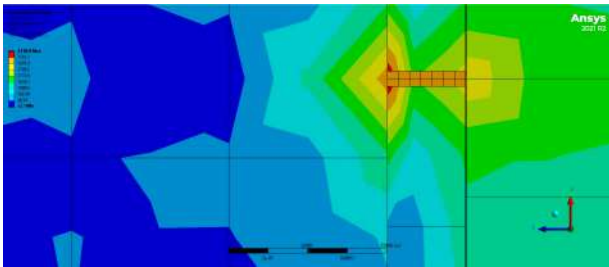


Рис. 12. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 1,5 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 12. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 1,5 mks (zirconium alloy)

Оценка потенциальной глубины термически нарушенного слоя показывает, что зона, в которой могут наблюдаться остаточные изменения структуры вследствие теплового воздействия, не превышает 45–50 мкм от исходной поверхности. Это делает циркониевые сплавы особенно чувствительными к повторным проходам и требует точного контроля съёма материала для обеспечения минимального влияния на приповерхностную структуру.

Кроме того, температурный уровень, достаточный для инициирования фазовых превращений в циркониевых сплавах (порядка 600 °С), также демонстрирует ограниченное проникновение вглубь заготовки. По результатам моделирования температура выше этого порога наблюдается лишь в пределах первых 150 мкм от поверхности. Это означает, что любые термически индуцированные изменения кристаллической решетки, такие как  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, зарождение интерметаллидных фаз или перераспределение легирующих элементов, будут происходить исключительно в этом диапазоне. Такая ограниченность может быть как преимуществом (в случае, если важно сохранить исходную структуру), так и потенциальным источником проблем при необходимости глубокой термообработки или многократной обработки поверхности.

#### Обсуждение результатов

Полученные в ходе численного моделирования данные позволяют сделать предварительные выводы о распределении температурного поля и масштабах термического воздействия при одиночном разряде в процессе ЭЭО. Температура в зоне действия разряда достигает 10 000 °С, при этом максимальные значения наблюдаются не на поверхности, а на небольшой глубине (около 25–200 мкм), что указывает на расплавление части заготовки. Температурный градиент в пределах кратера составляет порядка нескольких тысяч градусов, а характер температурного распределения остается симметричным, что отражает допущения, заложенные в модель. Стоит отметить, что подобная оценка не учитывает ряда факторов, которые в реальных условиях существенно влияют на общее течение процесса ЭЭО.

Так, несмотря на качественное совпадение температурных уровней с экспериментальными данными [38], численная модель демонстрирует некоторые идеализированные черты, в частности, строгую осевую симметрию температурного поля, плавный характер распределения температуры и резкое

ограничение зоны действия. Это может указывать на упрощения, принятые в расчетной схеме и физических допущениях модели. Для более полного анализа необходимо рассмотреть влияние факторов, не вошедших в текущую постановку задачи, но играющих существенную роль в реальных условиях обработки. Например, в модели не задавался учет механических эффектов, что влияет на некоторые отклонения от реального перераспределения тепла из-за образования плазменного канала и кавитационных пузырей. Поэтому реальный кратер в опытах отличается по форме (он менее симметричен и имеет зоны всплесков металла на краях). С точки зрения гауссового распределения теплового потока: центр разряда максимально нагрет, а по мере удаления температура резко падает. Такой результат также может быть вызван тем, что ANSYS не учитывает испарение материала явно, а только косвенно через температуру. Охлаждение в модели происходило только через боковые стенки, что не компенсирует интенсивность нагрева, и потому остаточное тепло сохраняется на большей площади. Это особенно характерно для моделирования в отсутствие конвекции со стороны диэлектрической жидкости, которая в работе не была учтена. При всех упрощениях в модели данные, полученные аналитическим методом, дают удовлетворительное сходжение с результатами экспериментальных исследований, полученных в более ранних статьях [38].

#### Выводы

Для выявления наиболее подходящих режимов обработки циркониевого сплава Э110 было решено исследовать результаты распространения тепла вглубь заготовки при различном времени воздействия. Другими словами, аналитически определить, как влияет различная величина времени длительности импульса на толщину расплавляемого материала и толщину дефектного слоя.

Полученные данные показали, что при меньшем времени импульса толщина расплавляемого материала, а также толщина дефектного слоя уменьшаются. Однако на практике при меньших значениях этого параметра происходит значительное увеличение времени обработки. При времени импульса, равного 1,5 мкс, глубина расплавляемого слоя для циркония составила порядка 13 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 31 мкм от исходной поверхности; при этом для титана глубина расплавляемого слоя равна порядка 28 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 53 мкм от исходной поверхности.

При времени импульса, равного 3 мкс, глубина расплавляемого слоя для циркония составила порядка 28 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 62 мкм от исходной поверхности, в то время как для титана глубина расплавляемого слоя равна порядка 85 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 135 мкм от исходной поверхности. Для нахождения рациональных режимов обработки, при которых будет наибольшая скорость обработки и наименьшая толщина дефектного слоя, необходима более сложная математическая модель, которая является целью дальнейших исследований.

#### Список источников / References

1. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электрическая эрозия металлов. В 2 вып. Москва: Госэнергиздат, 1944. 60 с.

- Lazarenko B. R., Lazarenko N. I. *Elektricheskaia eroziia metallov* [Electrical erosion of metals]. Moscow, 1944. Vol. 1-2. P. 60. (In Russ.).
2. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P. [et al.]. Advancing EDM through fundamental insight into the process. *CIRP Annals*. 2005. Vol. 54, no. 2. P. 64–87. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60020-1.
3. Descoeudres A. Characterization of electrical discharge machining plasmas. EPFL. 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3542.
4. Joshi S., Pande S. Development of an intelligent process model for EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45. P. 300–317. DOI: 10.1007/s00170-009-1972-4.
5. Beck J. V. Large time solutions for temperatures in a semi-infinite body with a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24, no. 1. P. 155–164.
6. Jilani S. T., Pandey P. C. Analysis and modelling of EDM parameters. *Precision Engineering*. 1982. Vol. 4. P. 215–221.
7. Pandit S. M., Rajurkar K. P. A stochastic approach to thermal modeling applied to electro-discharge machining. *ASME. J. Heat Transfer*. 1983. Vol. 105, no. 3. P. 555–562. DOI: 10.1115/1.3245621.
8. Dijck F., Dutré W. Heat conduction model for the calculation of the volume of molten metal in electric discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002. Vol. 7. P. 899. DOI: 10.1088/0022-3727/7/6/316.
9. Erden A., Kaftanoglu B. Heat transfer modelling of electric discharge machining. *Proceedings of the Twenty-First International Machine Tool Design and Research Conference*. London, 1981. DOI: 10.1007/978-1-349-05861-7\_46.
10. Jilani S. T., Pandey P. C. An analysis of surface erosion in electrical discharge machining. *Wear*. Vol. 84, Issue 3. 1983. P. 275–284. DOI: 10.1016/0043-1648(83)90269-7.
11. Pandey P. C., Jilani S. T. Plasma channel growth and the resolidified layer in EDM. *Precision Engineering*. 1986. Vol. 8. P. 104–110.
12. Beck J. V. Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24. P. 1631–1640.
13. Salah N. B., Ghanem F., Atig K. B. Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*. 2006. Vol. 46, no. 7-8. P. 908–911. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2005.04.022.
14. Jithin S., Raut A., Bhandarkar U. P. [et al.]. Finite element model for topography prediction of electrical discharge textured surfaces considering multi-discharge phenomenon. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 177. P. 105604. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105604.
15. Ming W., Zhen Z., Shengyong Y. [et al.]. Investigating the energy distribution of work piece and optimizing process parameters during the EDM of Al6061, Inconel718 and SKD11. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 4039–4056. DOI: 10.1007/s00170-017-0488-6.
16. Singh H. Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 55, no. 19-20. P. 5053–5064. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.004.
17. Zhang Y., Yonghong L., Yanget S. [et al.]. A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 75. P. 425–432. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.082.
18. Li Q., Yang X. Study on arc plasma movement and its effect on crater morphology during single-pulse discharge in EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. P. 5033–5047. DOI: 10.1007/s00170-020-04964-0.
19. Ghiculescu D., Marinescu N. I., Nanu S. Modelling aspects of removal mechanism at ultrasonic aided electro discharge machining. *International Journal of Material Forming*. 2009. Vol. 2. P. 685–688. DOI: 10.1007/s12289-009-0586-6.
20. Khatri B. C., Rathod P., Valaki J. B. Ultrasonic vibration – assisted electric discharge machining: A research review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016. Vol. 230, no. 2. P. 319–330. DOI: 10.1177/0954405415573061.
21. Mansoor S. M. Finite element analysis of magnetic field assisted wire electric discharge machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 402, no. 1. P. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/402/1/012051.
22. Ming W. Comparative study of energy efficiency and environmental impact in magnetic field assisted and conventional electrical discharge machining. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 214. P. 12–28. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.231.
23. Yu L. L. Research on mechanism and application of electrical discharge machining with synchronous servo double electrodes for non-conductive engineering ceramics. China University of Petroleum (East China). 2008. DOI: 10.2991/emeit.2012.280.
24. Yang X., Guo J., Chen X. [et al.]. Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro-EDM. *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35, no. 1. P. 51–57. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.09.005.
25. Yue X., Yang X. Molecular dynamics simulation of machining properties of polycrystalline copper in electrical discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2019. Vol. 233, no. 2. P. 371–380. DOI: 10.1177/0954405417748187.
26. Zhang G., Guo J., Minget W. [et al.]. Study of the machining process of nano-electrical discharge machining based on combined atomistic-continuum modeling method. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 290. P. 359–367. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.084.
27. Yue X., Yang X., Li Q. [et al.]. Novel methods for high-speed observation of material removal and molten pool movement in EDM. *Precision Engineering*. 2020. Vol. 66. P. 295–305. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.07.009.
28. Wang J., Han F. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*. 2014. Vol. 77. P. 56–65. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2013.10.007.
29. Zhu Z., Guo D., Xu J. [et al.]. Processing characteristics of micro electrical discharge machining for surface modification of TiNi shape memory alloys using a TiC powder dielectric. *Micromachines*. 2020. Vol. 11, no. 11. P. 1018. DOI: 10.3390/mi1111018.
30. Ming W., Zhang S., Zhang G. [et al.]. Progress in modeling of electrical discharge machining process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 187. P. 122563. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122563.
31. Dibitonto D. D., Eubank P. T., Patel M. R. [et al.]. Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66, no. 9. P. 4095–4103. DOI: 10.1063/1.343994.
32. Eubank P. T., Patel M. R., Barrufet M. A. [et al.]. Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model. *Journal of Applied Physics*. 1993. Vol. 73, no. 11. P. 7900–7909. DOI: 10.1063/1.353942.
33. Wang Z. L., Xie B. C., Wang, Y. K. [et al.]. Numerical Simulation of Cathode Erosion in EDM Process. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 462. P. 109–115. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.462.109.
34. Izquierdo B., Sanchez J., Plaza S. [et al.]. A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*. 2009. Vol. 49, no. 3-4. P. 220–229. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2008.11.003.
35. Jithin S., Bhandarkar U. V., Joshi S. S. Multi-spark model for predicting surface roughness of electrical discharge textured

surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. P. 3741–3758. DOI: 10.1007/s00170-019-04841-5.

36. Kansal H. K., Singh S., Kumar P. Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method. *Mathematical and Computer Modelling*. 2008. Vol. 47, no. 11-12. P. 1217–1237. DOI: 10.1016/j.mcm.2007.05.016.

37. Sundriyal S., Yadav J., Walia R. [et al.]. Thermophysical-based modeling of material removal in powder mixed Near-Dry electric discharge machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 6550–6569. DOI: 10.1007/s11665-020-05110-3.

38. Бобков Н. В., Федоров А. А., Полонянкин Д. А. [и др.]. Исследование влияния режимов проволочно-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.

Bobkov N. V., Fedorov A. A., Polonyankin D. A. [et al.]. Issledovaniye vliyaniya rezhimov provolochno-vyreznoy elektroerozionnoy obrabotki na morfologiyu, sherokhovatost' i treshchinoobrazovaniye poverkhnosti tugoplavkikh metallov [Investigation of the influence of EDM on morphology, roughness and cracking of surfaces 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.).

**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

**АРТЕМЕНКО Никита Сергеевич**, аспирант, инженер научно-исследовательской части Учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4907-4758

Адрес для переписки: dickydick89@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 15.01.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 30.05.2025.

**BOBKOV Nikolay Vladimirovich**, Senior Lecturer at 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 Alexey Arkadyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at 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

**ARTEMENKO Nikita Sergeevich**, Postgraduate, Research Engineer at the "Modern Manufacturing Technologies" Research and Production Center, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4907-4758

Correspondence address: dickydick89@mail.ru

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

The article was submitted 15.01.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 30.05.2025.

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

К. С. Леон, К. И. Порсев

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль

Статья посвящена анализу современного состояния в области управления качеством конструкторско-технологической подготовки цифровых производств. Рассматриваются основные тенденции и вызовы, возникающие перед предприятиями в условиях перехода к цифровым технологиям. Основное внимание уделено исследованию методов и инструментов, используемых для управления качеством конструкторско-технологической подготовки производств, таких как внедрение PLM-систем и применение технологий Индустрии 4.0. Описаны группы проблем, возникающих при проведении цифровизации в управлении качеством конструкторско-технологической подготовки производства. Определены перспективные направления исследований, необходимые для дальнейшего развития уровня управления качеством конструкторско-технологической подготовки производств.

**Ключевые слова:** информационные технологии, управление качеством, PLM, конструкторско-технологическая подготовка производства, цифровое производство, цифровая трансформация, системы менеджмента качества, эффективность производства.

**Для цитирования:** Леон К. С., Порсев К. И. Анализ современного состояния в области управления качеством конструкторско-технологической подготовки цифровых производств // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 49–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-49-54. EDN: NYJMIK.



© Леон К. С., Порсев К. И., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ANALYSIS OF QUALITY MANAGEMENT IN DIGITAL PRODUCTION DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION

K. S. Leon, K. I. Porsev

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

The article is devoted to the analysis of the current state of quality management of design and technological training of digital productions. The main trends and challenges facing enterprises in the context of the transition to digital technologies are considered. The main attention is paid to the research of methods and tools used for quality management of design and technological preparation of production facilities, such as the introduction of PLM systems, the use of Industry 4.0 technologies. The groups of problems that arise during digitalization in the quality management of design and technological training of production are described. Promising research directions necessary for further development of the quality management level of design and technological preparation of production facilities have been identified.

**Keywords:** information technology, quality management, PLM, design and technological preparation of production, digital production, digital transformation, quality management systems, production efficiency.

**For citation:** Leon K. S., Porsev K. I. Analysis of quality management in digital production design and technological preparation. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 49–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-49-54. EDN: NYJMIK.



© Leon K. S., Porsev K. I., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Современные тенденции четвертой промышленной революции показывают, что быстро развивающиеся цифровые технологии существенно меняют подходы к проектированию, производству и контролю качества продукции. Важнейшую роль в жизненном цикле изделий играет конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП), обеспечивающая наилучшее сочетание конструктивных решений и производственных возможностей. Управление качеством на этапе КТПП становится важным аспектом повышения конкурентоспособности цифровых производств, сокращения затрат и уменьшения времени вывода продукции на рынок.

Цель настоящего исследования заключается в анализе актуальных в настоящее время подходов, инструментов и технологий управления качеством конструкторско-технологической подготовки производства в контексте быстроразвивающейся цифровизации промышленных предприятий.

В данной работе были использованы такие методы исследования, как сравнительный анализ, синтез, аналогия, дедукция и обобщение.

Существующие системы менеджмента качества (СМК) часто фокусируются на контроле параметров процессов и качества продукции, не охватывая все аспекты жизненного цикла изделий. В эпоху Индустрии 4.0 возникает запрос на более глубокую интеграцию цифровых решений, которые позволяют осуществлять мониторинг в реальном времени и обеспечивать полное управление данными, связанными с качеством на всех этапах — от проектирования до утилизации [1]. Эта трансформация требует пересмотра концепций и методик, применяемых в СМК, а также их адаптации к новым вызовам.

Исходя из понятий качества и КТПП, можно сформулировать следующее определение: «Качество конструкторско-технологической подготовки производства — это совокупность характеристик конструкторских и технологических мероприятий, относящихся к их способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности при создании новых и совершенствование уже выпускаемых изделий» [2].

Цифровая трансформация оказывает существенное воздействие на процессы управления качеством КТПП, обуславливая необходимость трансформации существующих СМК и адаптации их к современным вызовам, возникающим при переходе к Индустрии 4.0. Переход к Индустрии 4.0 создает предпосылки для нового этапа развития менеджмента качества, основанного на цифровых технологиях и автоматизированных средствах, что открывает возможности значительного повышения эффективности КТПП [3]. Схожего мнения придерживается Краснораменский А. С.: «Цифровизация экономики оказывает значительное влияние на систему управления качеством, что требует от организаций адаптации к новым условиям и внедрению современных технологий» [4].

Коровкин В. В. и Кузнецова Г. В. [5] акцентируют свое внимание на том, что цифровая трансформация машиностроительной отрасли подразумевает интеграцию цифровых технологий и инновационных решений в производственные процессы, управление цепочками поставок и взаимодействие с заказчиками. В свою очередь исследование [6] посвящено изучению применения цифрового моделирования производственных процессов в тяжелом

машиностроении, демонстрируя особую значимость этих технологий на различных этапах жизненного цикла продукции.

Анализ зарубежных источников [7, 8] показал, что активный переход к Индустрии 4.0 подразумевает внедрение технологии цифровых двойников в процессы КТПП. Применение данных технологий позволяет на ранних этапах КТПП исключить ошибки, внести корректировки и подобрать необходимые режимы обработки. Также подчеркивается важность использования цифровизации в процессах управления качеством КТПП, но при этом отмечается неопределенность относительно анализа затрат и выгод от внедрения новых технологий [8].

Отечественные и зарубежные ученые, занимающиеся изучением управления качеством КТПП, сходятся во мнении, что цифровые платформы играют ключевую роль. Инновационные цифровые платформы содействуют более точному контролю и анализу, необходимому для улучшения производственных процессов, существенно снижая риски ошибок.

Кулева Н. И. и Степанов А. С. отмечают, что формирование единого информационного пространства для КТПП требует регулярного обновления СМК [9]. Этот процесс должен учитывать специфику каждого предприятия, включая ассортимент продукции, объем выпуска, организационную структуру, а также количество сотрудников. В работе [10] высказывается мнение, что высокий уровень качества разработки изделий достигается лишь благодаря комплексному подходу к повышению эффективности производства, который предполагает сокращение сроков выполнения работ, увеличение производительности и улучшение качества на всех этапах жизненного цикла изделия. Авторы работы предлагают создать единое информационное пространство путем внедрения технологий информационной поддержки изделий в процессе КТПП. Они также утверждают, что эти технологии должны базироваться на PLM-системах (англ. Product Lifecycle Management — управление жизненным циклом изделия). Внедрение таких технологий требует наличия новых компетенций у специалистов, осуществляющих управление качеством, что также обуславливает необходимость учебных программ и курсов по цифровой трансформации [11].

Стрелков Г. С. в своей работе отмечает значительное преимущество применения цифровых технологий, включая численное и виртуальное моделирование, CAD/CAM-системы (англ. Computer-aided Design — система автоматизированного проектирования; англ. Computer-aided manufacturing — система автоматизированного производства), PLM-системы. Данные технологии способствуют оптимизации и автоматизации производственных процессов, улучшая качество конструкторско-технологической подготовки производства [12].

В исследованиях иностранных ученых отмечается использование автоматизированных систем управления производством, позволяющих повысить качество КТПП до 25 % [13]. Зарубежные ученые в свою очередь больше преуспели во внедрении таких цифровых технологий, как искусственный интеллект, машинное обучение, IIoT (англ. Industrial Internet of Things — промышленный интернет вещей), AR/VR — технологий (англ. Augmented Reality — дополненная реальность; Virtual Reality — виртуальная реальность).

Применение технологии искусственного интеллекта и машинного обучения при управлении качеством КТПП позволяют давать рекомендации специалистам по качеству, помогая применять обоснованные решения на основе анализа различных данных. Указанные системы позволяют предотвращать не только возникновение дефектов готовой продукции на этапах изготовления [14], но и посредством применения цифровых технологий устранять дефекты на этапе проектирования путем всестороннего анализа конструкции [15].

Применение ИИТ при управлении качеством КТПП открывает новые перспективы для повышения эффективности и точности как процессов проектирования, так и производства. Зарубежные научные исследования подтверждают успешность внедрения данной технологии в различных областях промышленности [16, 17]. Следовательно, дальнейшее развитие данной технологии позволит сделать ИИТ неотъемлемой частью современного процесса управления качеством КТПП.

Многие зарубежные исследователи подтверждают успешность активного внедрения AR/VR-технологий в процессы управления качеством КТПП. В процессе проектирования изделий данные технологии позволяют значительно сократить время на выявление ошибок проектировщика [18]. Данные технологии позволяют проводить наглядную симуляцию и множественные эксперименты до запуска производства путем создания виртуальных моделей технологических процессов [19].

Группы отечественных и зарубежных ученых, занимающихся изучением вопроса внедрения инновационных технологий в процессы управления качеством КТПП, сходятся в важности цифровых преобразований процессов КТПП и необходимости повышения квалификации специалистов в условиях прогрессирующей цифровизации. При этом отечественные ученые уделяют внимание индивидуальному подходу к каждому предприятию, учитывая их особенности [10, 11]. Несмотря на различия в подходах в изучении, обе стороны вносят существенный вклад в развитие теории и практики управления качеством КТПП.

Эффективное управление качеством на предприятиях требует от сотрудников не только знаний, но и специфических навыков, актуальных для динамично меняющихся производственных процессов. В рамках СМК ключевую роль играет подготовка и постоянное обучение персонала. Это обеспечивается через внедрение программ, ориентированных на актуализацию знаний и развитие практических умений работников [20].

Исследования [21, 22, 23] обращают внимание на необходимость высокого уровня квалификации инженерного и рабочего персонала предприятия для улучшения качества как на этапе конструкторско-технологической подготовки производства, так и при выпуске продукции. По мнению авторов на качество продукции влияет не только правильность принятых конструкторских решений, но и во многом формируется грамотная технологическая подготовка производства. Несмотря на это, цифровые технологии в области инженерно-технологической подготовки применяются не в полном объеме. Решение таких задач, как сокращение сроков, повышение качества КТПП и обоснование технологических решений, возможно через внедрение автоматизированных систем управления жизненным циклом изделий на основе PLM-решений.

Исходя из представленных работ, можно сделать вывод, что инженеры, обладающие знаниями современных цифровых технологий, соответствуют требованиям современного цифрового производства. По мнению авторов данных работ, эти требования должны быть непосредственно отражены в профессиональных стандартах, что позволит значительно повысить уровень качества конструкторско-технологической подготовки производства. Как отмечается в [1], переход к цифровым технологиям в управлении качеством — это постепенный процесс, требующий не только технических изменений, но и трансформации менталитета сотрудников, что предполагает их активное участие в этой трансформации. Эмпатия, солидарность и готовность к изменениям становятся важными характеристиками, которыми должен обладать современный инженер.

СМК объединяет процессы, включая управление компетенцией персонала, который обеспечивает постоянное улучшение качества продукции [24]. Важно, чтобы у каждого работника была возможность понимать и принимать участие в процессах, влияющих на качество. Это связано с применением комплексных систем, в которых работают мотивирующие механизмы, способствующие росту компетенций и улучшению общей производительности коллективов.

Исследование [25] показывает, что при интеграции информационных технологий в процесс КТПП возникает конфликт интересов между отделами внедрения, конструкторским подразделением и отделом норм контроля при проектировании конструкторской документации, а также между отделом внедрения и технологическим отделом в процессе технологической подготовки производства. Автор утверждает, что эти разногласия возникают из-за недостаточной координации действий указанных отделов, что свидетельствует о низком уровне управленческих компетенций при внедрении информационных систем.

На уровне организационных структур следует отметить важность создания полноценных систем процедур и нормативных актов, которые будут определять взаимодействие между различными подразделениями и оптимизировать процессы управления качеством. В отсутствие четко структурированных процессов управление качеством может терять свою эффективность, что негативно сказывается на конечном продукте и имидже компании. Следует учитывать, что эффективность цифровых технологий будет зависеть от их полной интеграции в существующие процедуры и от способности сотрудников адаптироваться к новым условиям [11].

Зарубежные исследователи [26] поддерживают идею необходимости высокой квалификации специалистов при внедрении цифровых технологий. Также встречается вопрос, связанный с тем, что сотрудники сопротивляются нововведениям, опасаясь потери рабочих мест. При внедрении новых технологий необходимо обеспечить поддержку сотрудников и их вовлеченность в процесс изменений. В данном исследовании также поднимается вопрос информационной безопасности, связанный с внедрением цифровых технологий.

Отечественные и иностранные исследователи выдвигают вызовы, подчеркивающие сложность к переходу управления качеством КТПП при помощи цифровых технологий, но одновременно указывают на значительные возможности для повышения эффективности и конкурентоспособности предпри-

ятий, готовых инвестировать в развитие своих систем управления качеством КТПП.

Ряд экспертов считают, что в будущем системы управления качеством станут более интегрированными и гибкими, что обеспечит организациям значительное конкурентное преимущество. Важно отметить, что развитие технологий и изменение потребительских предпочтений требуют постоянного обновления знаний и навыков, что, в свою очередь, диктует необходимость внедрения новых методологий [27].

Таким образом, в условиях стремительной цифровизации и внедрения новых технологий управление качеством КТПП становится не просто необходимым, но и критически важным аспектом, определяющим конкурентоспособность и эффективность производственных процессов.

Современные тенденции в управлении качеством КТПП свидетельствуют о том, что основной упор делается на интеграцию цифровых технологий, что способствует значительному улучшению контроля и анализа качества КТПП на каждом этапе производственного процесса. Внедрение таких технологий, как искусственный интеллект, большие данные и интернет вещей, открывает новые горизонты для мониторинга и анализа качества, позволяя не только выявлять проблемы на ранних стадиях, но и предсказывать возможные сбои в производственном процессе. В свою очередь это способствует более эффективному управлению ресурсами и снижению затрат, что является важным фактором в условиях жесткой конкуренции на рынке.

Ключевые проблемы управления качеством, выявленные в ходе исследования, включают недостаточную квалификацию персонала, отсутствие четких стандартов и методик, а также сложности в интеграции новых технологий в существующие процессы. Эти проблемы требуют комплексного подхода к их решению, включая обучение и повышение квалификации сотрудников, а также активное использование современных технологий для оптимизации процессов.

Среди перспективных направлений исследований, необходимых для развития управления качеством КТПП цифровых производств, следует отметить следующие:

- развитие методологий и инструментов для управления жизненным циклом изделия;
- формирование методических требований по поэтапному внедрению системы управления качеством КТПП;
- создание методов количественной оценки функционирования системы управления качеством КТПП.

Таким образом, управление качеством в конструкторско-технологической подготовке цифровых производств представляет собой сложный и многогранный процесс, требующий комплексного подхода и постоянного совершенствования. Важно не только следовать современным тенденциям, но и активно участвовать в их формировании, что позволит организациям не только выжить в условиях жесткой конкуренции, но и занять лидирующие позиции на рынке.

#### Список источников / References

1. Васильев В. А., Александрова С. В., Летучев Г. М. Цифровые технологии в управлении качеством // Идеи

и новации. 2022. Т. 10, № 1-2. С. 125–129. DOI: 10.48023/2411-7943\_2022\_10\_1-2\_125. EDN: DWECNO.

Vasiliev V. A., Alexandrova S. V., Letuchev G. M. Tsifrovyye tekhnologii v upravlenii kachestvom [Digital technologies in quality management]. *Idey i novatsii. Ideas and Innovations*. 2022. Vol. 10, no. 1-2. P. 125–129. DOI: 10.48023/2411-7943\_2022\_10\_1-2\_125. EDN: DWECNO. (In Russ.).

2. Леон К. С., Порсев К. И. О качестве конструкторско-технологической подготовки цифрового машиностроительного производства // Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Екатеринбург, 19 декабря 2024 года. Екатеринбург: Издат. дом «Ажур», 2024. С. 127–130. EDN: NFVAOP.

Leon K. S., Porsev K. I. O kachestve konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki tsifrovogo mashinostroitel'nogo proizvodstva [On the quality of design and technological preparation of digital engineering production] // *Rol' tekhnicheskogo regulirovaniya i standartizatsii v epokhu tsifrovoy ekonomiki*. Ekaterinburg, 2024. P. 127–130. EDN: NFVAOP. (In Russ.).

3. Васильев В. А., Александрова С. В. Управление качеством наукоемких процессов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2024. № 9 (159). С. 33–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-33-41. EDN: AFWCZX.

Vasiliev V. A., Alexandrova S. V. Upravleniye kachestvom naukoymekikh protsessov [Quality management of knowledge-based processes]. *Naukoymkiye tekhnologii v mashinostroyenii. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2024. No. 9 (159). P. 33–41. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-33-41. EDN: AFWCZX. (In Russ.).

4. Краснораменский А. С. Трансформация системы менеджмента качества в условиях цифровизации экономики // Экономика. Бизнес. Инновации: сб. ст. XVII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 30 ноября 2021 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 35–37.

Krasnoramensky A. S. Transformatsiya sistemy menedzhmenta kachestva v usloviyakh tsifrovizatsii ekonomiki [Transformation of the quality management system in the context of the digitalization of the economy] // *Ekonomika. Biznes. Innovatsii*. Penza, 2021. P. 35–37. (In Russ.).

5. Коровкин В. В., Кузнецова Г. В. Перспективы цифровой трансформации российского машиностроения // *Ars Administrandi (Искусство управления)*. 2020. Т. 12, № 2. С. 291–313. DOI: 10.17072/2218-9173-2020-2-291-313. EDN: NXNOXM.

Korovkin V. V., Kuznetsova G. V. Perspektivy tsifrovoy transformatsii rossiyskogo mashinostroyeniya [Prospects for digital transformation in russian machine building industry]. *Ars Administrandi (Iskusstvo upravleniya)*. *Ars Administrandi (The Art of Governance)*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 291–313. DOI: 10.17072/2218-9173-2020-2-291-313. EDN: NXNOXM. (In Russ.).

6. Нигодин Ю. А., Нигодин Е. А. Цифровое моделирование производственного процесса в тяжелом машиностроении // *Механика XXI века*. 2023. № 22. С. 90–93. EDN: OOGKQF.

Negodin Yu. A., Negodin E. A. Tsifrovoye modelirovaniye proizvodstvennogo protsessa v tyazhelom mashinostroyenii [Digital modeling of the production process in heavy engineering]. *Mekhaniki XXI veku*. 2023. No. 22. P. 90–93. EDN: OOGKQF. (In Russ.).

7. Leng J., Wang D., Shen W. [et al.]. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: a review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 60. P. 119–137. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.05.011.

8. Maretto L., Faccio M., Battini D. The adoption of digital technologies in the manufacturing world and their evaluation: a systematic review of real-life case studies and future research agenda. *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 68. P. 576–600. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.05.009.

9. Кулева Н. И., Степанов А. С. Актуализация системы менеджмента качества предприятия при создании информационного пространства конструкторско-технологической подготовки производства // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сб. науч. тр. 2-й Всеросс. науч.-техн. конф., Курск, 27–28 мая 2020 года. Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2020. С. 131–134. EDN: AZOKTL.
- Kuleva N. I., Stepanov A. S. Aktualizatsiya sistemy menedzhmenta kachestva predpriyatiya pri sozdanii informatsionnogo prostranstva konstruktorsko-tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva [Updating the quality management system of an enterprise when creating an information space for design and technological preparation of production] // *Upravleniye kachestvom na etapakh zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh system*. Kursk, 2020. P. 131–134. EDN: AZOKTL. (In Russ.).
10. Антипова О. И., Хаймович И. Н., Чекмарев А. Н., Чурилин С. В. Управление качеством конструкторско-технологической подготовки производства с использованием базовой концептуальной модели данных // Вестник Самарского муниципального института управления. 2020. № 1. С. 7–19. EDN: DBPCFT.
- Antipova O. I., Khaimovich I. N., Chekmarev A. N., Churilin S. V. Upravleniye kachestvom konstruktorsko-tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva s ispol'zovaniyem bazovoy kontseptual'noy modeli dannykh [Quality management of design and technology reproduction using a basic conceptual data model]. *Vestnik Samarskogo munitsipal'nogo instituta upravleniya. Bulletin of Samara Municipal Institute of Management*. 2020. No. 1. P. 7–19. EDN: DBPCFT. (In Russ.).
11. Ковригин Е. А. Интеграция современных цифровых технологий в систему менеджмента качества высокотехнологичных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2020. 144 с.
- Kovrigin E. A. Integratsiya sovremennykh tsifrovyykh tekhnologiy v sistemu menedzhmenta kachestva vysokotekhnologichnykh predpriyatiy [Integration of modern digital technologies into the quality management system of high-tech enterprises]. Moscow, 2020. 144 p. (In Russ.).
12. Стрелков Г. С. Применение цифровых технологий проектирования в машиностроении: актуальное состояние и перспективы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 132–134. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-132-133. EDN: TRVDWN.
- Strelkov G. S. Primeneniye tsifrovyykh tekhnologiy proyektirovaniya v mashinostroyenii: aktual'noye sostoyaniye i perspektivy [Application of digital design technologies in mechanical engineering: current state and prospects]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. Proceedings of the Tula State University. Technical science*. 2024. No. 7. P. 132–134. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-132-133. EDN: TRVDWN. (In Russ.).
13. Mantravadi S., Moller C. An overview of next-generation manufacturing execution systems: how important is MES for industry 4.0? *Procedia manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 588–595. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.083.
- Huang G., Hu J., He Y. [et al.]. Machine learning for electronic design automation: A survey. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems (TODAES)*. 2021. Vol. 26, no. 5. P. 1–46. DOI: 10.48550/arXiv.2102.03357.
15. Adeyeye O. J., Akanbi I. Artificial intelligence for systems engineering complexity: a review on the use of ai and machine learning algorithms. *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. Vol. 5, no. 4. P. 787–808. DOI: 10.51594/csitrj.v5i4.1026.
16. Okuyelu O., Adaji O. AI-driven real-time quality monitoring and process optimization for enhanced manufacturing performance. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*. 2024. Vol. 39, no. 4. P. 81–89. DOI: 10.9734/jamcs/2024/v39i41883.
17. Hu Y. Industrial Internet of things intelligence empowering smart manufacturing: a literature review. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3367692.
18. Ho P. T. Study of augmented reality based manufacturing for further integration of quality control 4.0: a systematic literature review. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 1961. DOI: 10.3390/app12041961.
19. Husar J., Knapčíková L. Implementation of augmented reality in smart engineering manufacturing: a literature review. *Mobile Networks and Applications*. 2024. Vol. 29, no. 1. P. 119–132. DOI: 10.1007/s11036-023-02121-x.
20. Никольская В. А., Кошкина Г. В., Никольский С. В. Система управления персоналом в концепции системы менеджмента качества // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Науки об обществе и гуманитарные науки. 2024. № 3 (38). С. 76–80. DOI: 10.46573/2409-1391-2024-3-76-80. EDN: BHJVNK.
- Nikolskaya V. A., Koshkina G. V., Nikolsky S. V. Sistema upravleniya personalom v kontseptsii sistemy menedzhmenta kachestva [The personnel management system in the concept of a quality management system]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki ob obshchestve i gumanitarnyye nauki. Bulletin of Tver State Technical University. Series: Sciences of Society and Humanities*. 2024. No. 3 (38). P. 76–80. DOI: 10.46573/2409-1391-2024-3-76-80. EDN: BHJVNK. (In Russ.).
21. Спиридонов О. В. Требования к квалификации рабочих машиностроительной промышленности в условиях цифровой трансформации // Вектор экономики. 2020. № 1 (43). С. 88. EDN: RHBPWE.
- Spiridonov O. V. Trebovaniya k kvalifikatsii rabochikh mashinostroitel'noy promyshlennosti v usloviyakh tsifrovoy transformatsii [Requirements for the qualification of workers in the machine-building industry in the context of digital transformation]. *Vektor ekonomiki. Vector Economy*. 2020. No. 1 (43). P. 88. EDN: RHBPWE. (In Russ.).
22. Спиридонов О. В. Подготовка высококвалифицированных рабочих в машиностроении в соответствии с требованиями профессиональных стандартов // Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Белово, 26 марта 2020 г. Белово: Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2020. Т. 1. С. 149–154. EDN: JIERHR.
- Spiridonov O. V. Podgotovka vysokokvalifitsirovannykh rabochikh v mashinostroyenii v sootvetstviy s trebovaniyami professional'nykh standartov [Training of highly qualified workers in mechanical engineering in accordance with the requirements of professional standards] // *Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii. Innovations in technology and education*. Belovo, 2020. P. 149–154. EDN: JIERHR. (In Russ.).
23. Зайцев А. В., Спиридонов А. В. Цифровой функционал инженера-технолога в машиностроении // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2020. № 3 (12). С. 24–29. EDN: SSBTMR.
- Zaitsev A. V., Spiridonov A. V. Tsifrovoy funktsional inzhenera-tekhnologa v mashinostroyenii [Engineer-technology in mechanical engineering digital functional]. *Informatsionnyye tekhnologii. Problemy i resheniya. Information Technology. Problems and solutions*. 2020. No. 3 (12). P. 24–29. EDN: SSBTMR. (In Russ.).
24. Шемшурина С. А. Компетенция персонала в системе менеджмента качества // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. 2016. Т. 2, № 3. С. 214–221. EDN: WVQNIJ.
- Shemshurina S. A. Kompetentsiya personala v sisteme menedzhmenta kachestva [The competence of personnel in the quality management system]. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva. Vestnik of Volzhsky University named after V. N. Tatishchev*. 2016. Vol. 2, no. 3. P. 214–221. EDN: WVQNIJ. (In Russ.).

25. Чурилин С. В., Хаймович С. В. Конфликт интересов при внедрении информационных технологий в конструкторско-технологическую подготовку производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22, № 5 (97). С. 36–40. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-36-40. EDN: LKVEVW.

Churilin S. V., Khaimovich S. V. Konflikt interesov pri vnedrenii informatsionnykh tekhnologiy v konstruktorskotekhnologicheskuyu podgotovku proizvodstva [Conflict of interests in the implementation of information technologies in the design and technological preparation of production]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 22, no. 5 (97). P. 36–40. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-36-40. EDN: LKVEVW. (In Russ.).

26. Sader S., Husti I., Daroczi M. A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges. *Total Quality Management & Business Excellence*. 2022. Vol. 33, no. 9–10. P. 1164–1182. DOI: 10.1080/14783363.2021.1944082.

27. Горохова К. В. Перспективы развития системы менеджмента качества // Ученые записки Санкт-Петербургского им. В. Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии. 2021. № 2 (78). С. 78–82.

Gorokhova K. V. Perspektivy razvitiya sistemy menedzhmenta kachestva [Quality management system development prospects]. *Uchenyye zapiski Sankt-Peterburgskogo im. V. B. Bobkova filiala. Scientific Letters of Russian Customs Academy St. Petersburg Branch named after Vladimir Bobkov*. 2021. No. 2 (78). P. 78–82. (In Russ.).

**ЛЕОН Кирилл Сергеевич**, аспирант направления 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» Ярославского государственного технического университета (ЯГТУ), г. Ярославль.

SPIN-код: 3217-1646

AuthorID (РИНЦ): 1266091

Адрес для переписки: kiril.leon2000@yandex.ru

**ПОРСЕВ Кирилл Игоревич**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения» ЯГТУ, г. Ярославль.

SPIN-код: 6236-9993

AuthorID (РИНЦ): 890127

AuthorID (SCOPUS): 57205540730

Адрес для переписки: porsevki@ystu.ru

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

Статья поступила в редакцию 22.02.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 29.04.2025.

**ЛЕОН Kirill Sergeevich**, Postgraduate of the field of 2.5.22 "Product Quality Management. Standardization. Organization of Production", Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl.

SPIN-code: 3217-1646

AuthorID (RSCI): 1266091

Correspondence address: kiril.leon2000@yandex.ru

**PORSEV Kirill Igorevich**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Computer-integrated Technology Mechanical Engineering Department, YSTU, Yaroslavl.

SPIN-code: 6236-9993

AuthorID (RSCI): 890127

AuthorID (SCOPUS): 57205540730

Correspondence address: porsevki@ystu.ru

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

The article was submitted 22.02.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 29.04.2025.

## СТРАТЕГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ ИТЕРАТИВНОГО РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОДИФИКАЦИЙ

М. Н. Митягина, С. В. Мурашова

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

В работе представлены результаты исследования особенностей развития технических объектов на стадиях жизненного цикла продукции. С применением элементарных функций развития дано описание переходных фаз модификации в процессе существования, в результате которого сделан вывод о неизбежном устаревании объекта вследствие влияния закономерных факторов. Для нивелирования деградации объектов техники необходимо инициировать инновационные процессы, направленные на добавление продукту ценности. В основе инновационной деятельности лежит целевой вектор или стратегия, описывающая операции и ресурсы, необходимые для достижения планового результата. Для формирования стратегии управления развитием объектов техники предлагается использовать модульный метод анализа показателей качества, основанный на исследовании ситуационных, ретроспективных и предиктивных индикаторов, описываемых с применением трех видов карт: инновационного потока, технологических разрывов и фронтиров. В результате построения данных карт формируется комплексное представление о характере совершенствования технологий и перспектив ее развития, реализуемых в несколько итераций.

Ключевые слова: инновационный поток, S-кривая развития, кривая жизненного цикла продукта, устаревание, конкурентоспособность, патентная и маркетинговая аналитика.

**Для цитирования:** Митягина М. Н., Мурашова С. В. Стратегическое картирование итеративного развития технологий на основе модульного анализа показателей качества модификаций // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 55–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-55-63. EDN: FTZTKR.



© Митягина М. Н., Мурашова С. В., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## STRATEGIC MAPPING OF ITERATIVE TECHNOLOGY DEVELOPMENT BASED ON MODULAR ANALYSIS OF MODIFICATION QUALITY INDICATORS

M. N. Mityagina, S. V. Murashova

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The article presents the results of the technical facilities development at the stages of the product life cycle. Using elementary development functions, a description of the transitional phases of modification in the process of existence is given. As a result of which, a conclusion is drawn about the inevitable obsolescence of the object as a result of the influence of natural factors. To offset the degradation of engineering facilities, it is necessary to initiate innovative processes aimed at adding value to the product. Innovation is based on a target vector or strategy that describes the operations and resources needed to achieve a planned result. To form a strategy for managing the development of a technological solution, it is proposed to use a modular method for analyzing quality indicators based on the study of situational, retrospective and predictive indicators described using three types of maps: innovation flow, technological gaps and frontiers. As a result of the construction of these maps, a comprehensive understanding is formed of the nature of technology improvement and the prospects for its development, implemented in several iterations.

**Keywords:** innovation flow, S-development curve, product lifecycle curve, obsolescence, competitiveness, patent and marketing analytics.



© Mityagina M. N., Murashova S. V., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Введение

Конкурентоспособность продукции определяется совокупностью присущих модификациям характеристик, согласование с требованиями среды которых является ключевым индикатором для оценки уровня научно-технического развития не только каждого конкретного объекта, но и всей отрасли в целом. Последовательные изменения, вносимые в модификацию с целью добавления ей ценности посредством повышения степени соответствия технико-экономических показателей потребностям потребителей и макроэкономическим тенденциям, носят характер инновационных.

**Цель работы** — разработать модели поперидного добавления ценностных характеристик продуктовым модификациям для стратегического управления развитием технологий.

### Исследование проблемной области

Развитие технологий представляет собой процесс последовательного совершенствования качественных и количественных характеристик единичных элементов, входящих в состав модификаций. Изменения, вносимые в модификацию, могут носить характер улучшающих, то есть способствующих эволюционному развитию технологий. Если в результате совершенствования технологии произошёл переход на значительно более высокий уровень результирующих показателей, что стало причиной возникновения нового поколения модернизаций, тогда такие изменения являются революционными [1]. В совокупности, череда подобных преобразований необходима для обеспечения целевого уровня результативности функционирования объектов ввиду закономерной смены требований к качеству.

Повышение полезности объектов техники является стратегической целью как организационных систем, реализующих продукцию, так и потребителей, эксплуатирующих данный товар. Это связано с тем, что следствием реализации модификации, показатели которой в неполной мере соответствуют требованиям рынка, являются потери. Анализ потерь чаще всего проводится через оценку материальных затрат на обеспечение объекта на стадиях жизненного цикла в сравнении с аналогом. Следовательно, предупреждение потерь, связанных с реализацией устаревших технологий, является актуальной задачей для всех заинтересованных сторон. Значит, необходимо заблаговременно подходить к реализации технологических изменений.

Планирование совершенствования технологий необходимо начинать с исследования особенностей функционирования в течение всего периода их существования. Для этого необходимо обратиться к законам развития технических систем, которые описаны в [2, 3]. Так, любая технология проходит в своём развитии классические стадии, на каждой из которых динамика приращения результирующих характеристик различна и определяется вре-

менем, прошедшим от её зарождения и интеграции в конкурентную среду. Классической моделью, демонстрирующей поэтапность совершенствования технологии, является логистическая функция, известная также как S-кривая развития. Данный график отражает зависимость результатов и эффектов функционирования технологии от затрат ресурсов [1, 4–6]. Перенос логистической функции на конкретную модификацию описывается другой кривой переходных состояний — квадратичной функцией жизненного цикла продукции. Данная кривая имеет две ветви: восходящую и нисходящую, которые отражают стадии развития и устаревания соответственно [6–7]. Представим описанные простейшие модели изменения целевых показателей технических решений с течением времени на рис. 1.

Развитию технологий свойственен закономерный характер, предопределяющий неизбежное устаревание продукции в связи с невозможностью дальнейшего совершенствования объекта без инициации инновационных процессов. Вектор, характеризующий направление технологического перехода, описывается через совокупность преобразований, по результатам которых проводится дифференциальная оценка качества модификаций последовательных поколений. На основании данной оценки и формируется вывод относительно того, обладает ли обновлённое решение преимуществами относительно имеющихся аналогов. Кроме того, на рис. 1 представлены и другие индикаторы переходных состояний решений техники:

— заложенный при проектировании объекта резерв инновационного потенциала модификации, который с течением времени полностью исчерпывается ввиду достижения предельного состояния;

— конкурентоспособность продукции, которая падает из-за появления на рынке субституттов, обладающих более высоким уровнем полезности;

— кумулятивный эффект сосредоточенных в технологическом решении как позитивных, так и негативных аспектов, влияющих на ход эксплуатации продукта с учётом динамики конкурентной макроэкономической среды.

Нивелирование нисходящей траектории развития реализуется через развёртывание инновационных процессов, инициация которых обусловлена необходимостью сохранения конкурентоспособности объекта через добавление свойств новизны отдельным элементам технологии. В основе стратегии также лежит вектор переходных изменений, но уже описывающий порядок преобразования ситуационных показателей в перспективные целевые. Для того чтобы определить оптимальное управляющее воздействие, направленное на координацию инновационного потенциала модификации, необходимо сформировать стратегию развития технологии с учётом динамики всех текущих и потенциально возможных влияющих факторов среды. Однако для стратегического планирования недостаточно понимания особенностей развития технологий, описы-

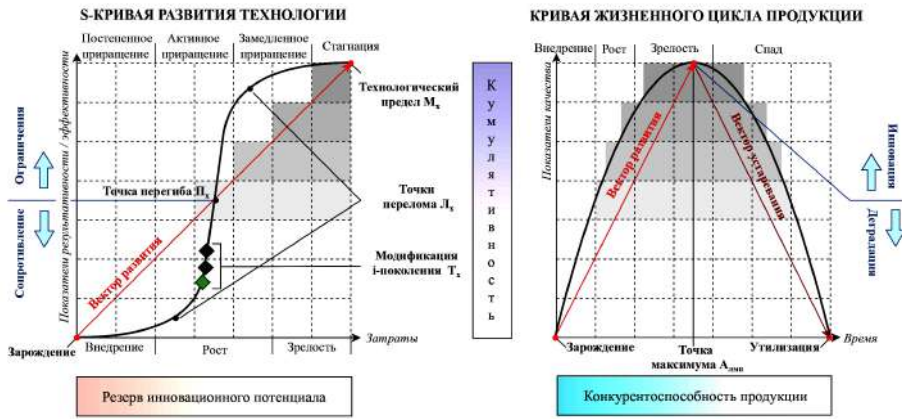


Рис. 1. Элементарные функции прогнозной экстраполяции развития технологий  
 Fig. 1. Elementary functions of forecast extrapolation of technology development



Рис. 2. Составные модели переходных состояний технологий [6, 8]  
 Fig. 2. Composite models of transition conditions of technologies [6, 8]

ваемых элементарными функциями. Для формирования стратегии необходимо комплексно описать порядок перехода продукта на новую итерацию жизненного цикла с применением совокупности кусочных функций.

На рис. 2 обратимся к сложным моделям, отражающим особенности переходных состояний в жизненном цикле, состоящем из нескольких итераций развития модификации. В основе представленных на рис. 2 моделей лежит сцепление элементарных функций, описанных на рис. 1.

Целесообразность замещения технологий связана с разницей инновационных потенциалов модификаций двух поколений. Подобная сравнительная оценка характеризует разрыв достигаемых в ходе эксплуатации результатов между замещаемым и замещающим технологическими решениями, которые описаны в [9]. Величина разрывов эффективностей модификаций соразмерна с возникающими в процессе реализации продукции потерями, нивелировать которые можно в том случае, если своевременно инициировать новую итерацию в жизненном цикле. Временной аспект в исследуемом вопросе связан с формированием стратегии развития модификации на основе возникающих предпосылок к устареванию. Обнаружение первичных сигналов производится на основе текущих показателей продукта, которые сравниваются не только с показателями качества аналогов, но и с собственными, достигнутыми в ретроспективе. Это необходимо для установления степени морально-технологической

деградации входящих в состав элементов. А формирование стратегии является планово-целевой функцией, реализация которой позволит достигнуть установленного уровня показателей при соблюдении определенных условий.

Таким образом, чтобы управлять развитием технологий, необходимо использовать модульный принцип анализа технических характеристик продукции, базирующийся на моделировании ретроспективных, ситуационных и предиктивных показателей качества.

### Материалы и методы исследования

Проведём исследование особенностей развития технологий освещения с применением модульного принципа показателей качества, классификация которых описана в ГОСТ 22851–77 «Выбор номенклатуры показателей качества промышленной продукции. Основные положения». Для построения стратегических карт выявим технические характеристики модификаций ламп освещения путём анализа патентной и маркетинговой информации. Для интерпретации полученных графических результатов рассмотрим нормативно-правовую документацию, которая относится ко всем видам исследуемых электрических ламп.

### Анализ полученных результатов

Построим стратегические карты, отображающие особенности инновационного развития технологий освещения.

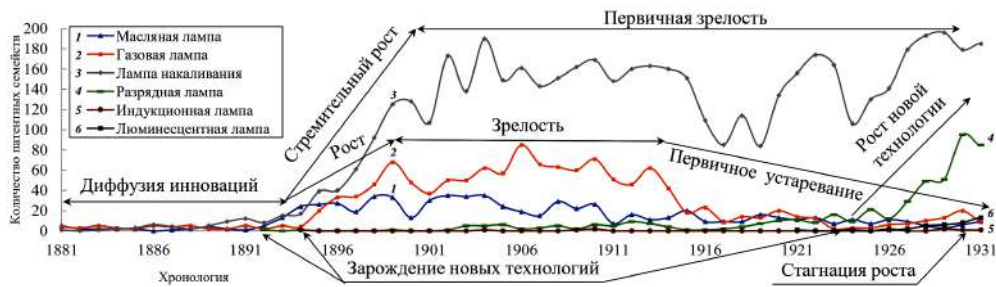


Рис. 3. Карта инновационного потока технологий освещения на основе ретроспективных данных 1881–1931 гг.  
 Fig. 3. Innovation flow map of lighting technologies based on retrospective data of 1881–1931

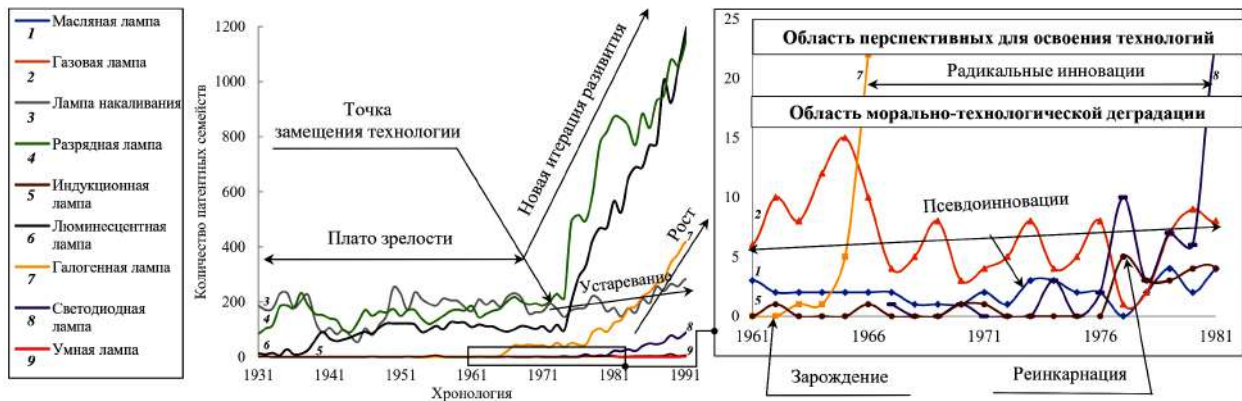


Рис. 4. Карта инновационного потока технологий освещения на основе ретроспективных данных 1931–1991 гг.  
 Fig. 4. Innovation flow map of lighting technologies based on retrospective data of 1931–1991

Первым исследуемым показателем качества продукции будет количество патентных семейств, которое относится к группе патентно-правовых показателей. Патентное семейство — это совокупность патентных документов, относящихся к одному изобретению, полезной модели или промышленному образцу, получившему правовую охрану в ряде стран мира. При помощи базы данных [10] реализуем несколько поисковых запросов для формирования патентной коллекции видов ламп освещения. Определим, что глубина поиска определяется первой обнаруженной информацией об объекте. Однако важно учесть, что не все патентные документы оцифрованы и внесены в международную базу, поэтому декомпозируем поученные результаты на три карты, на каждой из которых степень полноты информации определяется временным периодом наполнения патентной коллекции. Представим на рис. 3–5 получившиеся карты, на которых изображены кривые развития технологий с интерпретацией циклов переходных состояний, описанных ранее на рис. 1–2.

Представленная на рис. 3–5 декомпозиция кривых технологического развития отражает изменение характеристик модификаций ламп освещения, определяющих ценность продукта для потребителя. Описанное приращение ценностных характеристик является поперiodным, то есть происходящим поэтапно в соответствии с фазами технологического развития, которые формируются под воздействием факторов макроэкономической среды.

На рис. 3 представлена патентная информация, свидетельствующая о зарождении новых технологий, которые связаны с развитием электричества, и об их взаимном влиянии на уже освоенные реше-

ния масляных и газовых ламп. Динамика патентования показывает, что после распространения нового научного знания на смежные технологические отрасли произошло перераспределение инновационной продукции схожего назначения вследствие адаптации решений, обладающих повышенной ценностью относительно имеющихся аналогов. Одновременно наблюдается отрицательная динамика прироста патентных семейств одних модификаций при положительном тренде других. Это указывает на начало нового технологического цикла развития отрасли [11].

Разнородная динамика количества патентных семейств также представлена на рис. 5. Можно увидеть, что при сравнительно подобном развитии трёх различных технологий в пределах одного временного периода у одних наблюдается переход на новую итерацию развития из-за резкого увеличения количества изобретений, а у других — динамика хоть и остаётся неизменной, но свидетельствует о начале фазы устаревания. Стоит отметить, что устаревшие технологии остаются эффективными: целесообразность их применения определяется индивидуальными условиями среды эксплуатации каждого конкретного решения.

На рис. 5 представлена наиболее полная патентная коллекция, отражающая степень инновационного развития технологий освещения. Можно увидеть, что с 2008 г. произошёл стремительный рост патентов по различным модификациям светодиодных ламп. Для получения патента необходимо, чтобы разработанное решение обладало новизной, поэтому каждое запатентованное устройство или способ обладают характеристиками, которые превосходят прототип и аналоги по одному или не-



Рис. 5. Карта инновационного потока технологий освещения на основе ретроспективных и ситуационных данных 1991–2024 гг.

Fig. 5. Innovation flow map of lighting technologies based on retrospective data and situational data of 1991–2024

скольким существенным признакам. В то же время можно обнаружить фазу активного развития новой технологии освещения — умных ламп. Подобная динамика объясняется процессами цифровизации и распространения Интернета.

На карте ситуационного анализа представлена неполная информация о патентах из-за временного лага, однако изложенных данных достаточно для относительного определения текущей фазы развития технологий. Растущими являются такие технологии, которые имеют перспективы для освоения новых ниш. Например, появление новых конфигураций колбы, устройства цоколя, уменьшение размеров или создание новых светильников, используемых совместно с лампой.

Интерпретировать патентную информацию необходимо совместно с анализом нормативно-правовой документации. Путём исследования положений, описанных в [12–14], можно определить, что динамика инноваций в сфере освещения обусловлена требованиями законодательства в сфере экологического и энергетического регулирования. Представленные в документации показатели свидетельствуют об ограничении оборота неэффективных технологий для освещения: для каждого из видов ламп установлены пороговые значения показателей качества. Если модификации не присущи характеристики, представленные в [12–14], тогда её реализация фактически запрещена, но до тех пор, пока не будет достигнуто увеличение результативности по одному ключевому показателю или по группе показателей качества.

Таким образом, динамика патентования отражает характер научно-технического развития отрасли, который вызван повышением требований к качеству эксплуатируемых изделий. Причём рост требований к качеству продукции определяется увеличением требований к единичным показателям, которые формируют комплексную характеристику технологического решения. Вследствие имеющегося на рынке ряда товаров (субститутов) образуется разрыв между двумя технологиями из-за разницы в результативности функционирования объектов при равных или существенно различных затратах. Следовательно, появляется необходимость в оценке и интерпретации данных технологических разрывов.

Следующим шагом разработаем карты технологических разрывов модификаций для двух наиболее часто патентуемых видов ламп — люминесцентных и светодиодных. На рис. 5 можно обнаружить поло-

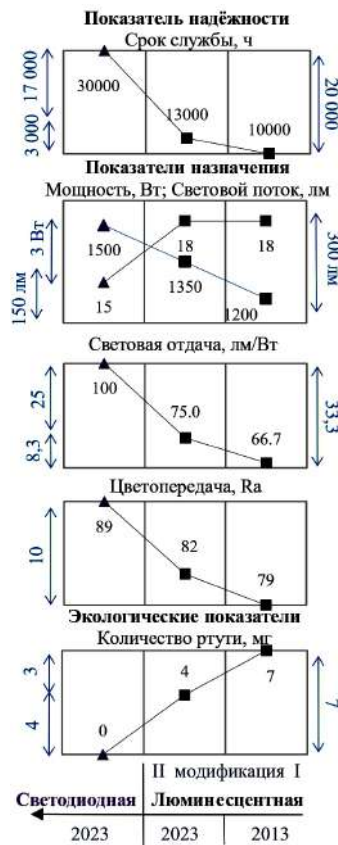


Рис. 6. Карта разрывов модификаций ламп общего назначения

Fig. 6. Gap map of general purpose lamp modifications

жение кривых, при котором светодиодные лампы, превзойдя по количеству патентов остальные виды ламп, заняли большую долю рынка осветительных технологий. Это произошло ввиду повышения требований не только к энергоэффективности ламп, но и содержанию в них ртути. Так, люминесцентные лампы хотя и обладают эксплуатационными преимуществами относительно других видов ламп, но требуют специальных условий хранения и утилизации из-за имеющейся в конструкции ртути. Принятие Минаматской конвенции о ртути [14] утвердило требования к лампам с ртутью и установило условия для их производства и эксплуа-

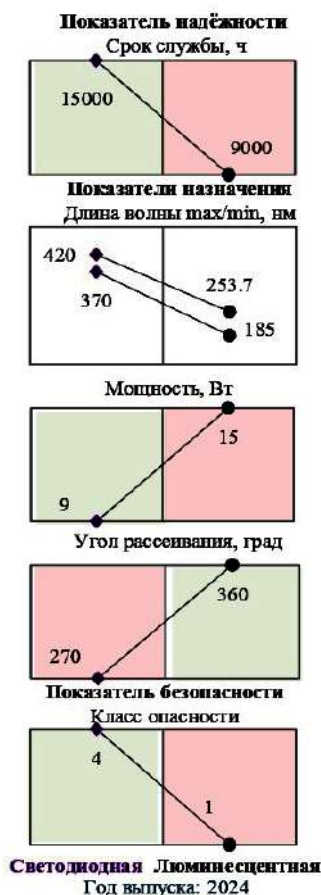


Рис. 7. Карта разрывов модификаций ламп специального назначения  
 Fig. 7. Gap map of special-purpose lamp modifications

тации. Среди требований к качеству подобных ламп — максимальный объём ртути или полный запрет ртутных ламп с низкой эффективностью.

Проведём маркетинговый анализ: вывзим имеющиеся на рынке модификации ламп, определим их технические характеристики и реализуем дифференциальную оценку показателей качества. При проведении маркетингового исследования рынка осветительных ламп отдельным индикатором, необходимым для обоснования целесообразности производства и использования конкретных модификаций ламп, является стоимость товара, значение которой необходимо для оценки эффективности реализуемого объекта.

На рис. 6 представлены карты технологических разрывов на основе единичных показателей качества ламп общего назначения с одинаковой стоимостью и следующими характеристиками: тип колбы Т8, длина колбы 600 мм, цветовая температура 6500 К.

Представленные на рис. 6 показатели качества модификаций двух видов ламп необходимо оценить с двух позиций. Во-первых, это степень развития люминесцентных технологий с течением времени и при имеющихся ограничениях, установленных в документации. Можно увидеть, что у модификации 2023 г. выпуска увеличился срок службы и цветопередача при уменьшении объема ртути на 4 мг в сравнении с модификацией 2013 г. выпуска. Кроме того, произошло увеличение светового потока при неизменном значении мощности, следовательно,

но, увеличилась и энергоэффективность. Однако в сравнении со светодиодной лампой люминесцентная всё равно проигрывает по ряду показателей. У светодиодной лампы срок службы более чем в два раза превосходит люминесцентную, а также выше световая отдача и цветопередача при нулевом содержании ртути. Можно сделать вывод о том, что единичные показатели люминесцентных ламп хотя и улучшились с течением времени, но всё равно не превосходили ни по одному из индикаторов светодиодную. Следовательно, для целей общего освещения, с учётом равной стоимости товаров, целесообразно приобрести именно светодиодную лампу. Впрочем для решения других задач, связанных с созданием специальных условий, необходимых для производственных или иных целей, проведённый анализ может оказаться нерелевантным. Значит, необходимо реализовать ещё одну сравнительную оценку исследуемых видов ламп, но уже специального назначения. На рис. 7 представим карту технологических разрывов для ультрафиолетовых ламп с цоколем E27, стоимость которых примерно равна и отличается друг от друга менее чем на 3 %.

Согласно представленным на рис. 7 значениям, была проведена дифференциальная оценка качества модификаций, при которой базовым образом является светодиодная лампа, а оцениваемым — люминесцентная. По результатам оценки зелёным отмечены показатели качества, которые превосходят по своему значению сравниваемый образец. Однако важно учесть, что качество продукта определяется индивидуальными требованиями потребителей и условиями эксплуатации, поэтому дополнительно представим ещё один показатель — длину волны. Поскольку исследуемые ультрафиолетовые лампы предназначены для эксплуатации именно в специальных условиях, то длина волны станет в данном случае определяющим показателем для оценки степени соответствия присущих показателей модификации потребностям. Сформированные показатели длин волн исследуемых ламп позволяют сделать следующий вывод: обе лампы предназначены для использования в специальных условиях, однако длина волны люминесцентной лампы указывает на необходимость её применения в целях бактерицидного действия, в то время как применение светодиодной ультрафиолетовой лампы обусловлено целями создания спецэффектов, криминалистики или археологии. Следовательно, несмотря на преимущества светодиодной лампы, её применение в целях, не являющихся общим освещением, определяется индивидуальными требованиями и условиями среды. С одной стороны, это означает, что у светодиодных ламп есть инновационный потенциал для разработки обновлённых модификаций и расширения условий практической применимости, а с другой — невозможности полного исключения из использования ламп с ртутью. Таким образом, построенные карты технологических разрывов модификаций позволили оценить степень конкурентоспособности продукции и обосновать целесообразность их применимости в конкретных условиях.

Ключевой частью стратегического анализа является прогнозирование: определение возможных перспектив для развития технологий и поиска путей достижения планово-целевых показателей. В совокупности необходимо определить целевой вектор развития, описывающий точки начальной и конечной перспективного состояния модифицируемого

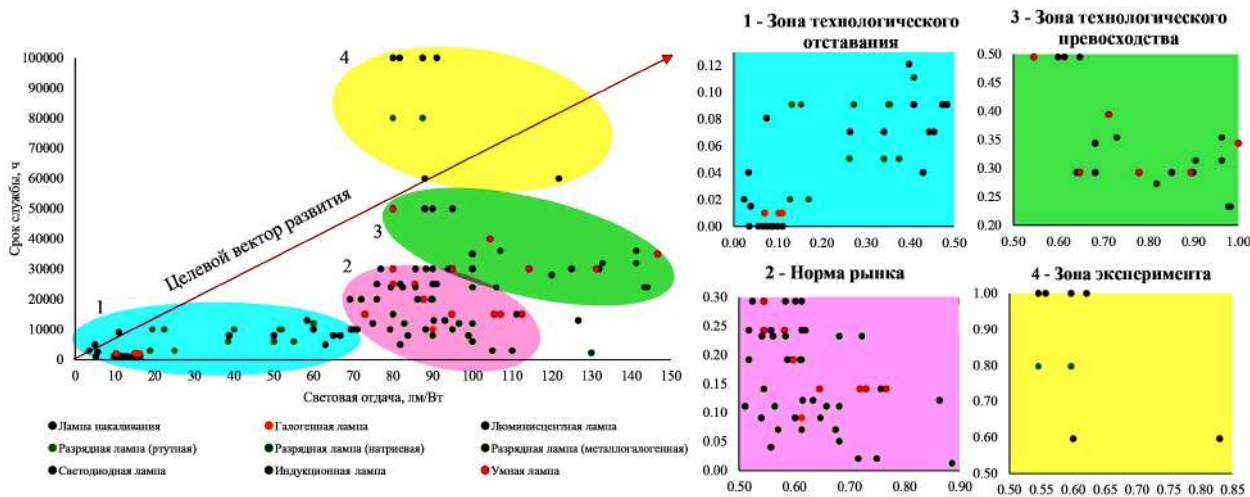


Рис. 8. Карта технологических фронтов развития ламп общего освещения с декомпозицией областей согласно нормированным значениям показателей качества модификаций  
 Fig. 8. Technology frontiers map of general lighting lamps development with areas decomposition according to standardized values of quality indicators of modifications

технологического решения. Значит, необходимо обозначить ряд показателей качества продукта, полученных по результатам предиктивного анализа.

Для того чтобы определить направление совершенствования технологий освещения проведём исследование фронтов развития, то есть областей, отражающих степень технологического прогресса через описание имеющихся на рынке продуктов, обладающих различными ценностными характеристиками [15]. Идентификация технологического фронта представляет собой процесс сравнительной оценки присущих различным модификациям показателей качества, на основании которых можно сформировать вывод о степени конкурентного преимущества относительно имеющихся на рынке субститутов. Выявление фронтов развития необходимо для формирования проактивной стратегии управления качеством, основанной на выявлении тех решений техники, улучшение показателей которых будет способствовать обеспечению не только текущих, но и перспективных требований потребителей. Результатом от внедрения данной стратегии станет нивелирование устаревания продукта на ранней стадии зарождения признаков за счёт реализованного превентивного воздействия, направленного на повышение технико-экономических показателей объекта.

Для проведения анализа областей развития определим две основные потребительские характеристики электрических ламп — это срок службы и световая отдача. Обозначим, что целью является достижение как можно большей продолжительности срока службы при максимальной световой отдаче. Рассмотрим имеющиеся на рынке решения и построим карту фронтов согласно определённым показателям качества на рис. 8.

На рис. 8 представлены фронты развития электрических ламп, применяемых для общего освещения. Зона технологического отставания содержит модификации ламп, показатели которых ниже установленных в [13] значений. Значит, подобные лампы морально и технологически устарели. Оставшиеся фронты указаны согласно величине, определяющей степень достижения целевого результата и близости к стратегическому вектору. Согласно выделенным зонам можно оценить, какие из модифи-

каций обладают преимуществом и какая из технологических соответствует заявленным требованиям.

Карта фронтов отражает степень совершенствования технологии и перспективы для инновационного развития модификаций. В сочетании с патентным анализом можно сделать вывод о характере данного развития. Например, патенты, получаемые на лампы накаливания, защищают решения, не относящиеся к комнатному освещению, и большинство таких патентов получены на полезные модели, для которых критерий изобретательского уровня отсутствует. Таким образом, возникает новая ниша для инновационного развития.

### Заключение

Проведённый анализ показателей качества продукции на основе патентно-маркетингового анализа технических характеристик позволил сформировать три вида стратегических карт, необходимых для исследования инновационного развития отрасли. Построение моделей было реализовано с применением модульного принципа исследования индикаторов модификаций, основанного на выявлении путей совершенствования технологий через анализ ситуационных и ретроспективных показателей качества. По результатам проведённого анализа технико-экономических показателей продукции можно сформировать вывод относительно конкурентоспособности реализуемого решения, а также целесообразности его модификации или модернизации, замены или утилизации. Применение предложенных моделей поможет сформировать оптимальное управляющее воздействие, направленное на координацию инновационного потенциала технологического решения на стадиях жизненного цикла продукта, и предотвратить устаревание объекта, а значит, и нивелировать потери, связанные с реализацией решений, показатели качества которых в неполной степени обеспечивают требования потребителей и соответствуют тенденциям макроэкономической среды.

### Список источников / References

1. Кристенсен К. М. Дилемма инноватора: как из-за новых технологий погибают сильные компании: практ. рук. Москва: Альпина Паблишер, 2021. 342 с.

Kristensen K. M. Dilemma innovatora: kak iz-za novykh tekhnologiy pogibayut sil'nyye kompanii: prakt. ruk [Innovator's dilemma: how strong companies die because of new technologies: a practical guide]. Moscow, 2021. 342 p. (In Russ.).

2. Рубин М. С., Мисюченко И. Л., Щедрин Н. А. Законы развития: от технических к функционально-целевым системам // ТРИЗ в развитии. 2023. № 1. С. 23–49. DOI: 10.24412/cl-37095-2023-1-23-49.

Rubin M. S., Misyuchenko I. L., Shchedrin N. A. Zakony razvitiya: ot tekhnicheskikh k funktsional'no-tselevym sistemam [Laws of evolution: from technical to functional-and-targeted systems]. *TRIZ in Evolution*. 2023. No. 1. P. 23–49. DOI: 10.24412/cl-37095-2023-1-23-49. (In Russ.).

3. Селиванов С. Г., Поезжалова С. Н., Шайхулова А. Ф. Законы и закономерности инноватики // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2018. № 2 (23). С. 10–25. EDN: XYZSEX.

Selivanov S. G., Poyezhalova S. N., Shaykhulova A. F. Zakony i zakonmernosti innovatiki [The laws and regularities of innovation]. *Innovatika i ekspertiza: nauchnyye trudy. Innovatics and Expert Examination*. 2018. No. 2 (23). P. 10–25. EDN: XYZSEX. (In Russ.).

4. Конобеева А. Б., Есаков В. А., Маркова О. В. Технологический уклад в жизненном цикле экономики // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2022. № 1. С. 7–21. DOI: 10.52210/2224669X\_2022\_1\_7. EDN: YKCKWU.

Konobeyeva A. B., Esakov V. A., Markova O. V. Tekhnologicheskii uklad v zhiznennom tsikle ekonomiki // Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta MFYuA. *Herald of the Moscow University of Finances and Law MFUA*. 2022. No. 1. P. 7–21. DOI: 10.52210/2224669X\_2022\_1\_7. EDN: YKCKWU. (In Russ.).

5. Sood A., Tellis G. The S-Curve of Technological Evolution: Marketing Law or Self-Fulfilling Prophecy?. *SSRN Electronic Journal*. 2007. DOI: 2007.10.2139/ssrn.981532.

6. Митягина М. Н., Назаревич С. А. Детерминанты управления изменениями в условиях проявления патологических признаков организационных элементов // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. тр. V Всерос. науч. конф. Санкт-Петербург: Изд-во ГУАП, 2024. С. 194–198.

Mityagina M. N., Nazarevich S. A. Determinanty upravleniya izmeneniyami v usloviyakh proyavleniya patologicheskikh priznakov organizatsionnykh elementov [Determinants of change management in conditions of manifestation of pathological signs of organizational elements]. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem. Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems*. Saint Petersburg, 2024. P. 194–198. (In Russ.).

7. Хадисов М. Р. Б., Маташева Х. П. Теоретические аспекты жизненного цикла продукта и его компоненты // Образование. Наука. Научные кадры. 2022. № 1. С. 160–162. DOI: 10.24411/2073-3305-2022-1-160-162. EDN: LRDBXN.

Khadisov M. R. B., Matasheva Kh. P. Teoreticheskiye aspekty zhiznennogo tsikla produkta i ego komponenty [Theoretical aspects of the product life cycle and its components]. *Obrazovaniye. Nauka. Nauchnyye kadry. Education. Science. Scientific Personnel*. 2022. No. 1. P. 160–162. DOI: 10.24411/2073-3305-2022-1-160-162. EDN: LRDBXN. (In Russ.).

8. Sood A., Tellis G. Technological Evolution and Radical Innovation. *Journal of Marketing*. 2006. Vol. 69 (3). P. 152–168. DOI: 10.1509/jmkg.69.3.152.66361.

9. Митягина М. Н. Моделирование технологических разрывов модификаций элементов сложных технических систем // Приборостроение-2024: материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. 2024. С. 157–158.

Mityagina M. N. Modelirovaniye tekhnologicheskikh razryvov modifikatsiy elementov slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Modeling technological gaps in modifications of

complex technical systems elements]. *Priborostroyeniye-2024. Instrumentation Engineering-2024*. 2024. P. 157–158. (In Russ.).

10. Международная патентная база данных PATENTSCOPE. URL: <https://www.wipo.int/ru/web/patentscope> (дата обращения: 25.12.2024).

PATENTSCOPE International Patent Database. URL: <https://www.wipo.int/ru/web/patentscope> (accessed: 25.12.2024). (In Russ.).

11. Перепечко Л. Н., Цукерблат Д. М. Прогнозирование научно-технического развития на основе патентной информации // Информационное общество. 2020. № 4. С. 63–79. EDN: QLJJDR.

Perepechko L. N., Tsukerblat D. M. Prognozirovaniye nauchno-tekhnicheskogo razvitiya na osnove patentnoy informatsii [Forecasting of scientific and technical development based on patent information]. *Informatsionnoye obshchestvo. Information Society*. 2020. No. 4. P. 63–79. EDN: QLJJDR. (In Russ.).

12. Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности товаров, работ, услуг при осуществлении закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд: постановление Правительства РФ от 31 декабря 2009 г. № 1221 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2010. № 5. Ст. 525. Доступ из справочно-правовой системы «Гарант».

Ob utverzhdenii Pravil ustanovleniya trebovaniy energeticheskoy effektivnosti tovarov, rabot, uslug pri osushchestvlenii zakupok dlya obespecheniya gosudarstvennykh i munitsipal'nykh nuzhd: postanovleniye Pravitel'stva RF ot 31 dekabrya 2009 g. № 1221 [On approval of the rules for establishing energy efficiency requirements for goods, works, and services in procurement for state and municipal needs: Decree of the Government of the Russian Federation No. 1221 of December 31, 2009] // *Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii. Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2010. No. 5. Art. 525. Available at Garant. (In Russ.).

13. Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения: постановление Правительства Российской Федерации от 24.12.2020 г. № 2255 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2021. № 1. Ст. 120. Доступ из справочно-правовой системы «Гарант».

Ob utverzhdenii trebovaniy k osvetitel'nykh ustroystvam i elektricheskim lampam, ispol'zuyemym v tseyakh peremennogo toka v tsel'yakh osveshcheniya: postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 24.12.2020 g. № 2255 [On approval of requirements for lighting devices and electric lamps used in Alternating Current Circuits for lighting purposes: Decree of the Government of the Russian Federation dated 24.12.2020 No. 2255] // *Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii. Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2021. No. 1. Art. 120. Available at Garant. (In Russ.).

14. Минаматская конвенция о ртути. URL: <https://www.mercom-1.ru/instructions/Minamata/Minamata-Convention-booklet-rus-full-2017.pdf> (дата обращения: 30.12.2024).

Minamatskaya konventsiya o rtuti [Minamata Convention on Mercury]. URL: <https://www.mercom-1.ru/instructions/Minamata/Minamata-Convention-booklet-rus-full-2017.pdf> (accessed: 30.12.2024). (In Russ.).

15. Балацкий Е. Идентификация технологического фронта // Форсайт. 2021. Т. 15, № 3. С. 23–34. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.3.23.34. EDN: WXENQA.

Balatskiy E. Identifikatsiya tekhnologicheskogo frontira [Identification of the technology frontier]. *Forsayt. Foresight and STI Governance*. 2021. Vol. 15, no. 3. P. 23–34. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.3.23.34. EDN: WXENQA. (In Russ.).

**МИТЯГИНА Мария Николаевна**, магистрант Центра развития института интеллектуальной собственности Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург. SPIN-код: 2737-7496

AuthorID (РИНЦ): 1251146  
ORCID: 0009-0007-5745-6075

Адрес для переписки: maryamoll@yandex.ru

**МУРАШОВА Светлана Витальевна**, кандидат экономических наук, доцент (Россия), доцент Центра развития института интеллектуальной собственности Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 9161-5732

AuthorID (РИНЦ): 53257

Адрес для переписки: svmurashova@itmo.ru

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

Статья поступила в редакцию 04.04.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 12.05.2025.

**MITYAGINA Maria Nikolaevna**, Master's Student at the Center for the Development of the Institute

of Intellectual Property, ITMO University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 2737-7496

AuthorID (RSCI): 1251146

ORCID: 0009-0007-5745-6075

Correspondence address: maryamoll@yandex.ru

**MURASHOVA Svetlana Vitalevna**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Center for the Development of Intellectual Property, ITMO University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 9161-5732

AuthorID (RSCI): 53257

Correspondence address: svmurashova@itmo.ru

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

The article was submitted 04.04.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 12.05.2025.



УДК/UDC 621.313.8

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-64-71

EDN: DEYXKD

Научная статья / Original article

## ОПТИМИЗАЦИЯ РОТОРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ С ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ В ФОРМЕ ДУГИ ЭЛЛИПСА

В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, А. Ю. Милютин

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск

В статье выполнена оптимизация ротора синхронной машины с тангенциально намагниченными магнитами, форма полюсных наконечников которого соответствует дуге эллипса. Моделирование магнитной цепи синхронной машины выполнено в программе *FEMM*. Решение оптимизационной задачи осуществлялось методом покоординатного спуска. По каждой координатной оси минимальное значение целевой функции определялось методом дихотомии. Допустимые диапазоны изменения варьируемых величин, которые задают размеры конструктивных элементов ротора, были учтены в виде границ отрезков в методе дихотомии по каждой координатной оси. Рассчитаны оптимальные значения размеров постоянных магнитов и полюсных наконечников на роторе, заданных по форме в виде дуги эллипса для четырехполюсной машины. Выполнено сравнение кривых нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней расточки сердечника статора синхронной машины с полюсными наконечниками в виде дуги окружности и в виде дуги эллипса. Изготовлен макетный образец четырехполюсной электрической машины с постоянными магнитами на роторе, получены кривые ЭДС обмотки статора на холостом ходу.

**Ключевые слова:** синхронная машина, постоянный магнит, магнитное поле, полюсный наконечник, оптимизация, метод покоординатного спуска, метод дихотомии.

**Для цитирования:** Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. Оптимизация ротора магнитоэлектрической синхронной машины с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 64–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-64-71. EDN: DEYXKD.



© Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## OPTIMIZATION OF THE ROTOR OF A MAGNETOELECTRIC SYNCHRONOUS MACHINE WITH POLE TIPS SHAPED AS ELLIPTICAL ARCS

V. V. Kharlamov, Yu. V. Moskalev, A. Yu. Milyutin

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

The article optimizes the rotor of a synchronous machine with tangentially magnetized magnets. The rotor pole tips have a shape resembling an arc of an ellipse. The simulation of the magnetic circuit of a synchronous machine is performed using the *FEMM* program. The optimization problem is solved using the coordinate-by-coordinate descent method; for each coordinate axis, the minimum value of the objective function is determined by the dichotomy method. Permissible ranges of variation for the variable values, which define the dimensions of the rotor's structural elements, are considered as segment boundaries within the dichotomy method for each coordinate axis. The optimal size values of the permanent magnets and pole tips on the rotor, shaped as an elliptical arc for a four-pole machine, are calculated. The curves of the normal component of magnetic induction in the air gap of a synchronous machine with pole tips shaped as both a circular arc and an elliptical arc are compared. A mock-up of a four-pole electric machine with permanent magnets on the rotor is constructed, and the electromotive force curves of the stator winding at idle are obtained.

**Keywords:** synchronous machine, permanent magnet, magnetic field, pole tip, optimization, coordinate descent method, dichotomy method.

**For citation:** Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu. Optimization of the rotor of a magnetoelectric synchronous machine with pole tips shaped as elliptical arcs. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 64–71. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-64-71. EDN: DEYXKD.



© Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) получают все большее распространение в различных отраслях промышленности и на транспорте [1 – 8]. Например, это сверхскоростные двигатели-генераторы газовых турбин, генераторы микрогидроэлектростанций, ветрогенераторы, исполнительные двигатели в системах автоматики и телемеханики, двигатели воздушных винтов летательных аппаратов, электромобилей, компрессоров, насосов для медицинского оборудования и т.д.

Такие электрические машины имеют высокие энергетические и массогабаритные показатели, более простую и надежную конструкцию возбуждения из-за отсутствия обмотки возбуждения, источника постоянного тока и элементов скользящего тока. Благодаря этому рабочие частоты вращения ротора СМПМ могут достигать 500 тысяч оборотов в минуту [8].

Повышение энергетических и массогабаритных показателей, показателей надежности СМПМ осуществляется при проектировании за счет оптимизации конструкции, применения современных материалов и совершенствования технологии изготовления. Для повышения прочности конструктивных элементов и снижения потерь находят применение углеродное волокно и аморфная сталь [8].

В настоящее время известно большое количество конструкций роторов с постоянными магнитами (ПМ) [1 – 10]. На практике часто находят применение следующие схемы размещения призматических магнитов, встроенных в ротор: с радиальным намагничиванием; с тангенциальным намагничиванием; с намагничиванием по схеме Хальбаха; V-образная схема размещения [3, 4, 7 – 11].

Различные варианты размещения ПМ на роторе представлены в виде блок-схемы, приведенной на рис. 1. Схемы размещения отличаются между собой расположением магнитомягких и немагнитных материалов (втулок, полюсных наконечников, секторов между ПМ и т.п.), направлением намагниченности магнитов. Оптимальные схемы конструкции роторов часто определяются в результате решения оптимизационных задач в зависимости от области применения электрической машины [6, 12 – 16]. При этом повышается эффективность использования энергии постоянных магнитов за счет уменьшения магнитных полей рассеивания, уменьшения сопротивления магнитной цепи СМПМ благодаря изменению формы магнитомягких и немагнитных материалов на роторе.

На практике распространение получили ПМ в виде прямой четырехугольной призмы. Сборные роторы с такими магнитами просты в изготовлении и позволяют изготавливать магнитоэлектрические машины с высокими массогабаритными показателями [3, 4]. Одной из перспективных является схема ротора с тангенциально намагниченными магнита-

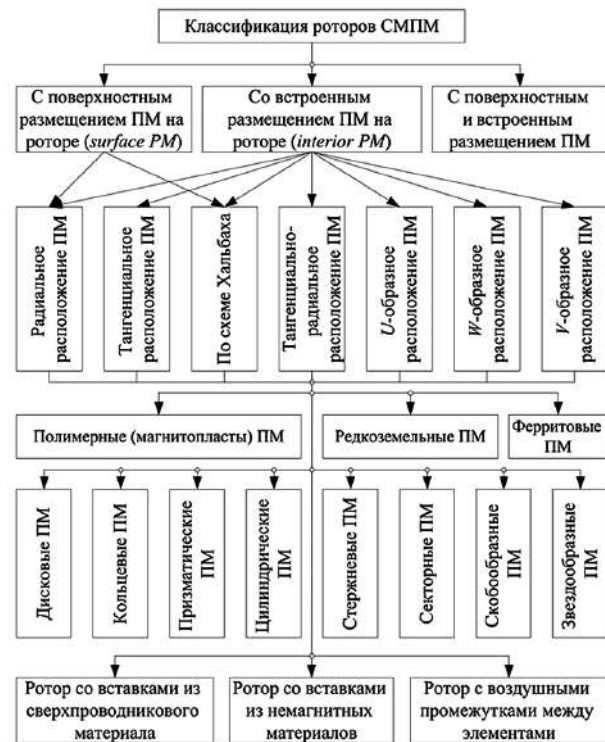


Рис. 1. Классификация схем размещения ПМ на роторе СМПМ

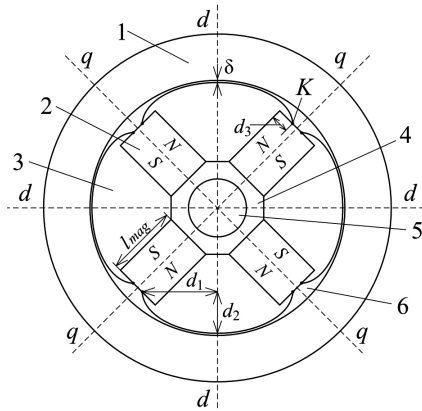
Fig. 1. Classification of schemes of PM arrangement on the PMSM rotor

ми, так как такая схема позволяет обеспечить максимальное использование энергии магнитов [3, 4].

Полюсные наконечники роторов с призматическими ПМ обычно изготавливаются в виде дуги окружности [3, 4]. Для увеличения нормальной составляющей магнитной индукции и уменьшения содержания в ней высших гармоник полюсные наконечники можно изготавливать в виде дуги эллипса, что позволит улучшить массогабаритные показатели, уменьшить потери мощности и пульсации момента СМПМ.

Выполним расчет оптимальных размеров конструктивных элементов ротора с призматическими тангенциально намагниченными магнитами и с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса. Схема магнитной цепи четырехполюсной СМПМ для оптимизации ротора приведена на рис. 2.

При расчете приняты следующие допущения: для исключения зубцовых гармоник сердечник статора принят гладким; высококоэрцитивные магниты имеют одинаковые размеры и кривые размагничивания, отсутствует эксцентриситет ротора, не учитывается реакция якоря (СМПМ без нагрузки).



**Рис. 2. Схема магнитной цепи СМПМ для оптимизации ротора с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса:**  
 1 — сердечник статора;  
 2 — постоянный магнит;  
 3 — сегмент из магнитомягкого материала; 4 — втулка из немагнитного материала; 5 — вал;  
 6 — неравномерный воздушный зазор

**Fig. 2. Scheme of the PMSM magnetic circuit for rotor optimization with pole tips in the ellipse arc:**  
 1 — stator core;  
 2 — permanent magnet;  
 3 — segment from magnetic soft material; 4 — sleeve from non-magnetic material; 5 — shaft; 6 — non-standard air gap

Для оптимизации ротора составлена модель магнитной цепи электрической машины в программе *FEMM*; свойства постоянных магнитов и других материалов соответствуют материалам библиотеки этой программы [17].

На рис. 2 показаны величины, которые изменяются в заданных допустимых диапазонах при оптимизации:  $\delta$  — минимальное расстояние в воздушном зазоре между полюсным наконечником и сердечником статора;  $l_{mag}$  — длина постоянного магнита;  $d_1$  — половина длины большей оси дуги эллипса полюсного наконечника;  $d_2$  — половина длины малой оси дуги эллипса полюсного наконечника;  $d_3$  — расстояние от угла постоянного магнита до точки *K* (см. рис. 2). Концы отрезка большой оси эллипса находятся на гранях постоянных магнитов, размещенных по обеим сторонам от полюсного наконечника (точка *K* на рис. 2).

Составление модели электрической машины и расчет в программе *FEMM* для различных вариантов входных данных выполняется с использованием языка программирования высокого уровня, при этом обеспечивается симметрия магнитной цепи СМПМ.

При решении оптимизационной задачи необходимо определить такие значения переменных модели  $\delta$ ,  $l_{mag}$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$ , при которых изменение нормальной составляющей индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора будет синусоидальным:

$$B_{n, \sin}(l_i) = B_{cp} \sin\left(\frac{2}{R_1} l_i - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

где  $R_1$  — это радиус внутренней окружности сердечника статора, м;  $B_{cp}$  — среднее значение модуля

магнитной индукции вдоль окружности внутренней расточки статора:

$$B_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{B_{n_i}^2 + B_{t_i}^2}, \quad (2)$$

где  $N$  — количество точек по внутренней окружности статора ( $i = 1 \dots N$ ), для которых определяются значения магнитной индукции;  $B_{n_i}$  и  $B_{t_i}$  — нормальная и тангенциальная составляющие вектора магнитной индукции  $i$ -й точки вдоль окружности сердечника статора  $l$  соответственно, Тл.

Оптимальные размеры элементов ротора определены при минимизации следующего критерия:

$$F = \sum_{i=1}^N (B_{n_{i, \text{расч}}}(l_i) - B_{n_{i, \text{син}}}(l_i))^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $B_{n_{i, \text{расч}}}(l_i)$  — модуль вектора нормальной составляющей индукции в  $i$ -й точке внутренней окружности сердечника статора, рассчитанный в результате моделирования при заданных значениях независимых переменных, Тл.

На каждой итерации выполняется сравнение кривой распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней расточки сердечника статора с синусоидой.

В качестве примера приняты следующие размеры при моделировании магнитной цепи СМПМ: наружный диаметр сердечника статора — 160 мм; внутренний диаметр сердечника статора — 102 мм; диаметр вала — 16 мм; длина окружности по внутренней расточке статора ( $l$ ) равна 320 мм.

Все элементы магнитной цепи заданы материалами из библиотеки программы *FEMM* [17]: из магнитомягкого материала выполнены сердечник статора и секторы между магнитами (сталь марки М19), вал ротора стальной, неодимовые магниты *NdFeB* (37 МГОе с коэрцитивной силой 950 кА/м).

Решение оптимизационной задачи осуществлялось методом покоординатного спуска, по каждой координатной оси минимальное значение целевой функции (3) определялось методом дихотомии [18]. Допустимые диапазоны изменения варьируемых величин, которые задают размеры конструктивных элементов ротора, были учтены в виде границ отрезков в методе дихотомии по каждой координатной оси. Это необходимо для того, чтобы исключить недопустимые варианты входных переменных, при которых элементы конструкции ротора будут «пересекаться» между собой.

Допустимые диапазоны изменения переменных величин для заданных размеров магнитной цепи приняты равными:  $1 \text{ мм} \leq \delta \leq 2 \text{ мм}$ ;  $30 \text{ мм} \leq l_{mag} \leq 36 \text{ мм}$ ;  $29 \text{ мм} \leq d_1 \leq 30 \text{ мм}$ ;  $18 \text{ мм} \leq d_2 \leq 19 \text{ мм}$ ;  $0 \text{ мм} \leq d_3 \leq 7,2 \text{ мм}$ . Точка *K* может «смещаться» при оптимизации вдоль грани постоянного магнита, на которой она размещена (см. рис. 2), от точки, соответствующей углу магнита до середины грани.

Алгоритм определения оптимальных размеров конструктивных элементов ротора СМПМ с тангенциально намагниченными магнитами и полюсными наконечниками в форме дуги эллипса приведен на рис. 3.

Пояснить алгоритм оптимизации можно следующим образом: задаются допустимые диапазоны изменения варьируемых величин (блок 1); устанавливаются коэффициенты, необходимые для метода дихотомии (блок 2); вектору *X* задаются значения, соответствующие срединам интервалов допусти-

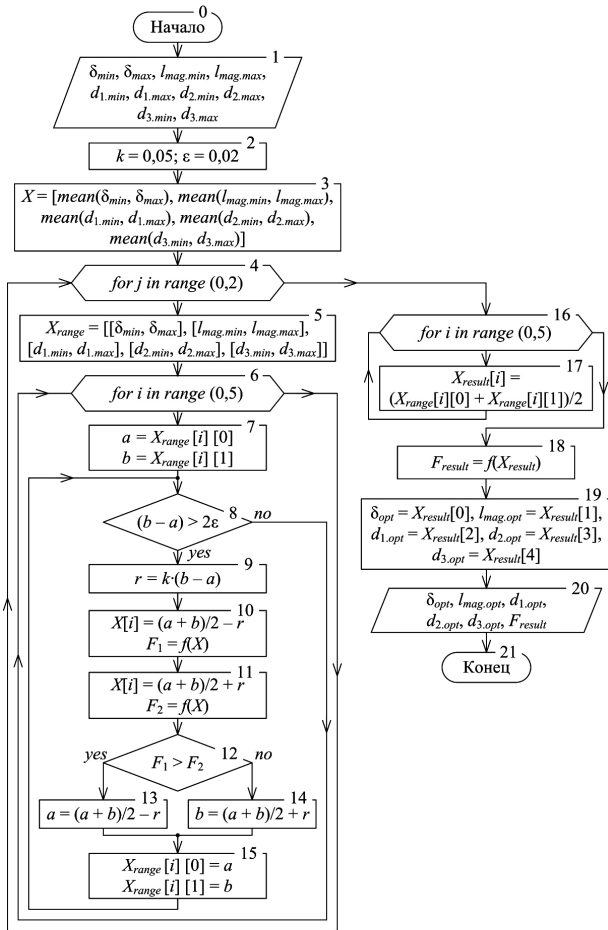


Рис. 3. Алгоритм для определения оптимальных размеров конструктивных элементов ротора СМПМ с тангенциально намагниченными магнитами и полюсными наконечниками в форме дуги эллипса

Fig. 3. Algorithm for determining the optimal dimensions of the structural elements of the PMSM rotor with tangentially magnetised magnets and pole tips in the ellipse arc

мых диапазонов изменения варьируемых величин (блок 3). Устанавливается необходимое количество повторений ( $j$ ) метода покоординатного спуска при различных начальных значениях входных величин (блок 4); в массиве  $X_{range}$  задаются допустимые диапазоны изменения варьируемых величин (блок 5); переменная ( $i$ ) устанавливает поочередно одну из пяти координат, для которой определяется минимальное значение целевой функции  $f(X)$  (блок 6). При оптимизации методом дихотомии используются две вспомогательные переменные ( $a, b$ ), которые содержат информацию об изменении границ интервалов каждой варьируемой величины, начиная с допустимых диапазонов, заданных в начале оптимизации (блок 7).

Далее поочередно по каждой переменной методом дихотомии определяется значение величины, при которой значение целевой функции будет минимально. Пока допустимый диапазон между значениями ( $a, b$ ) больше заданной величины  $2\epsilon$  выполняется поиск минимума (блок 8); рассчитывается значение вспомогательной переменной  $r$  (блок 9). Определяются координаты двух точек на расстоянии  $r$  от середины диапазона на каждой итерации ( $a + b)/2 \pm r$  и значения целевой функции в этих точках  $F_1$  и  $F_2$ . Выполняется сравнение значений целевой функции в точках  $F_1$  и  $F_2$ . Если  $F_1 > F_2$ , то принимается новое минимальное значение допустимого диапазона  $(a + b)/2 - r$ , иначе принимается новое максимальное значение допустимого диапазона  $(a + b)/2 + r$  (блоки 10 и 11). Обновляется значение допустимого диапазона по рассматриваемой координате в массиве  $X_{range}$  (блок 15).

При решении оптимизационной задачи метод покоординатного спуска используется два раза с различными начальными значениями вектора  $X$ . На первой итерации вектор  $X$  содержит начальные значения пяти переменных, которые равны средним значениям допустимых интервалов варьируемых величин (блок 3). При повторном исполь-

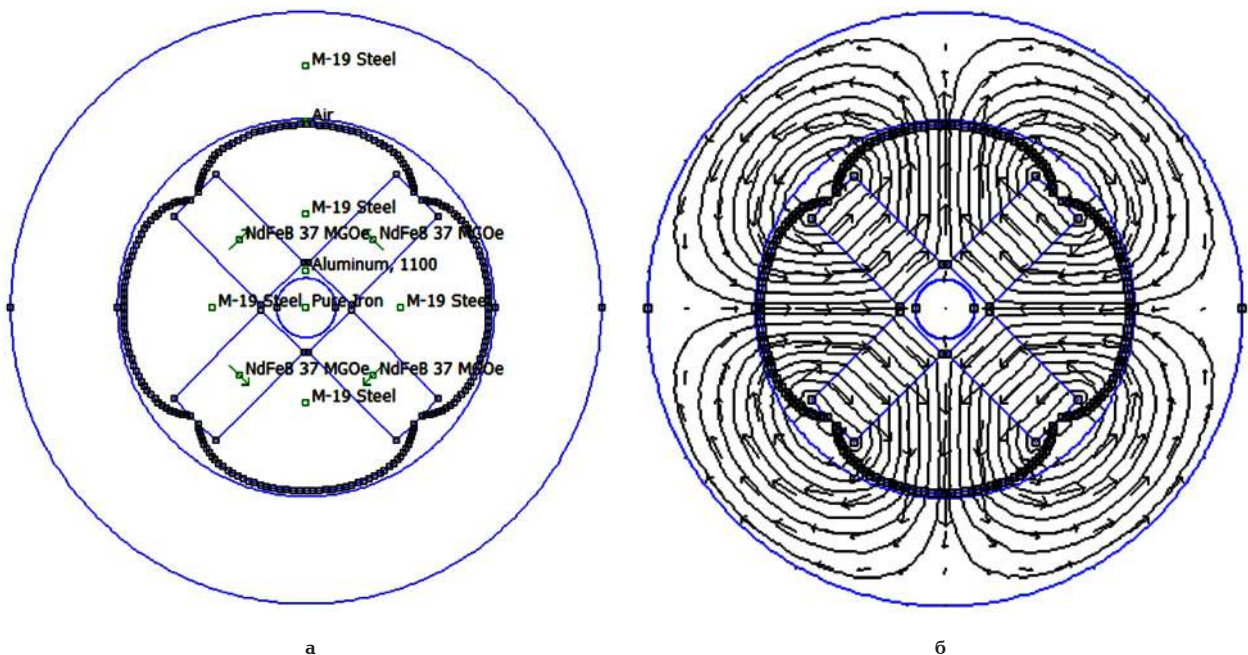


Рис. 4. Схема магнитной цепи СМПМ с оптимальными размерами элементов ротора с полюсными наконечниками в виде дуги эллипса: а — модель в программе FEMM; б — картина магнитного поля  
 Fig. 4. Scheme of the PMSM magnetic circuit with optimal dimensions of the rotor elements with pole tips in the ellipse arc: а — model in FEMM programme; б — magnetic field view

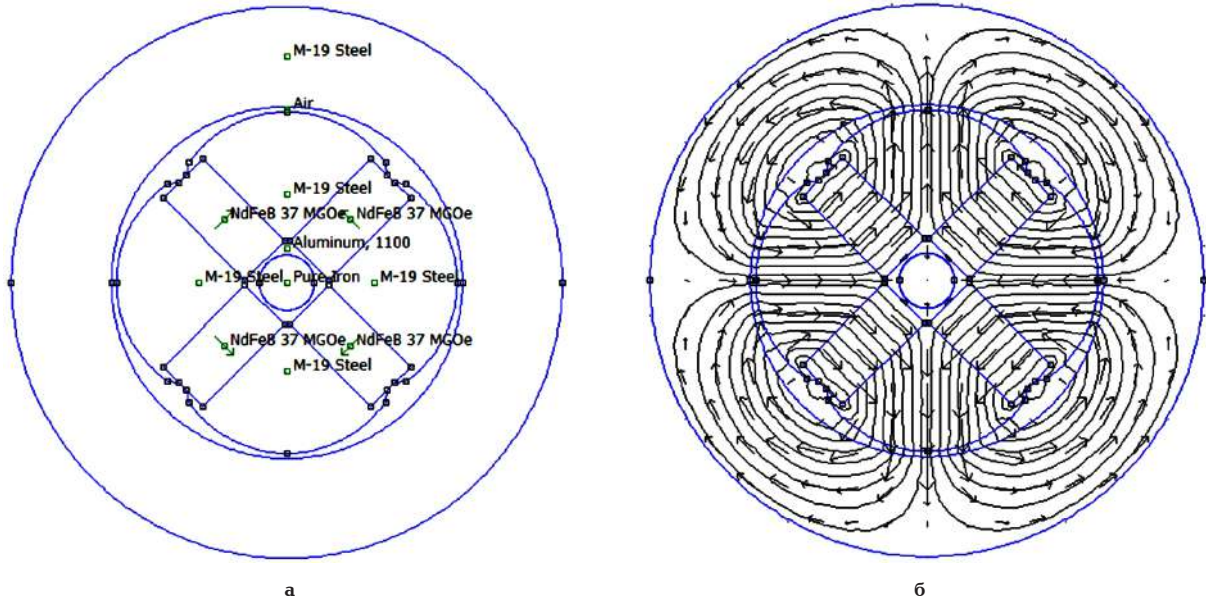


Рис. 5. Схема магнитной цепи СМПМ с полюсными наконечниками на роторе в виде дуги окружности:  
 а — модель в программе FEMM; б — картина магнитного поля  
 Fig. 5. Scheme of the PMSM magnetic circuit with rotor pole tips shaped as circular arcs:  
 а — FEMM program model; б — magnetic field distribution

зовании метода покоординатного спуска вектор  $X$  содержит начальные значения варьируемых параметров, определенные при расчете этим методом первый раз.

При выполнении расчета дважды с различными начальными значениями вектора  $X$  были получены одинаковые значения диапазонов варьируемых переменных в массиве  $X_{range}$ , с использованием которых определен вектор с оптимальными значениями переменных  $X_{result}$  (блоки 16 и 17). Далее рассчитано минимальное значение целевой функции (блок 18), присвоены значения из вектора каждой из пяти переменных (блок 19) и выполнен вывод оптимальных значений размеров элементов ротора (блок 20).

Необходимо отметить, что целевая функция  $f(X)$  возвращает значение, рассчитанное по выражению (3) для разных значений переменных величин из допустимых диапазонов.

При решении задачи определены оптимальные значения независимых переменных:  $\delta_{min} = 1,49$  мм;  $l_{mag} = 33,7$  мм;  $d_1 = 29,1$  мм;  $d_2 = 18,2$  мм;  $d_3 = 6,9$  мм.

Схема магнитной цепи СМПМ и картина магнитного поля с оптимальными размерами элементов ротора приведены на рис. 4. Выполним сравнение распределения магнитной индукции для роторов с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса и дуги окружности. Полюсные наконечники по форме в виде дуги окружности могут быть изготовлены с различным центральным углом для электрических машин с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением [1–4, 9].

На рис. 5 приведена схема магнитной цепи СМПМ (а) и картина магнитного поля (б) с полюсными наконечниками на роторе в виде дуги окружности. Размеры элементов магнитной цепи СМПМ для двух рассмотренных вариантов одинаковые, центральный угол дуги окружности выбран таким образом, чтобы обеспечить такое же расстояние в воздушном зазоре между полюсным наконечником и сердечником статора  $\delta$  (см. рис. 2).

Графики распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окруж-

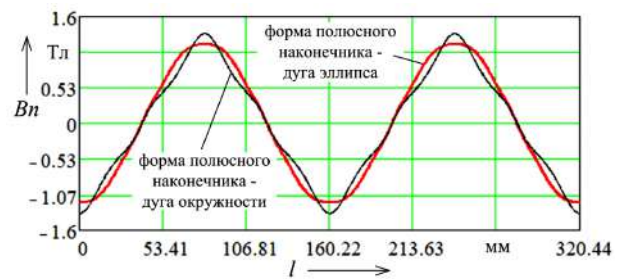


Рис. 6. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора  
 Fig. 6. Normal component distribution of magnetic induction along the inner circle of the stator core

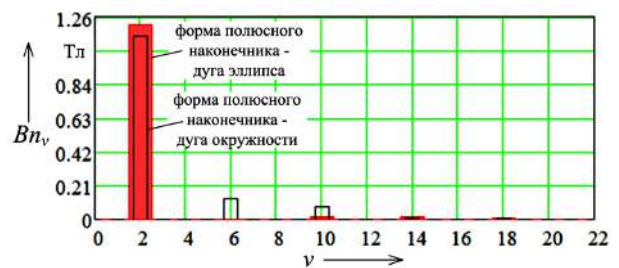


Рис. 7. Гармонический состав нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора СМПМ  
 Fig. 7. Harmonic structure of the normal component of magnetic induction along the inner circle of the PMSM stator core

ности сердечника статора для роторов с полюсными наконечниками в виде дуги окружности и дуги эллипса показаны на рис. 6. Результат разложения в ряд Фурье нормальной составляющей распределения магнитной индукции для двух рассмотренных вариантов приведен на рис. 7.

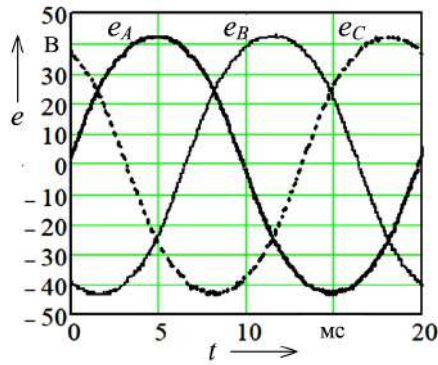
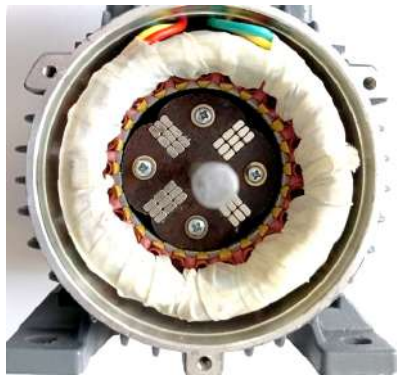


Рис. 8. Экспериментальные исследования СМПМ:  
 а — макетный образец; б — ЭДС обмотки статора  
 Fig. 8. Experimental research of PMSM:  
 а — layout sample; б — EMF of the stator winding

Амплитудные значения основной гармоники магнитной индукции равны 1,14 Тл и 1,21 Тл для роторов с полюсными наконечниками в виде дуги окружности и дуги эллипса соответственно.

Спектр нормальной составляющей магнитной индукции СМПМ содержит по три высшие гармоники: с полюсными наконечниками в виде дуги окружности — 6-я (0,127 Тл), 10-я (0,079 Тл) и 14-я (0,004 Тл); с полюсными наконечниками в виде дуги эллипса — 10-я (0,012 Тл), 14-я (0,012 Тл) и 18-я (0,007 Тл).

Наличие пазов сердечника статора с многофазной обмоткой приводит к появлению зубцовых гармоник в рабочем магнитном потоке; при изготовлении с полюсных наконечников по форме в виде дуги эллипса можно уменьшить значения высших гармоник в нормальной составляющей магнитной индукции и увеличить значение основной гармоники, что позволит улучшить показатели работы СМПМ.

Для проверки теоретических расчетов собран макетный образец СМПМ с использованием асинхронной машины стандартной серии, у которой короткозамкнутый ротор заменен на ротор с постоянными магнитами (рис. 8а). При испытании макетного образца на холостом ходу с использованием цифрового осциллографа «Rigol» при частоте вращения ротора 1500 об/мин получены кривые фазных ЭДС близкие по форме к синусоидальным (рис. 8б).

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1) предложен подход для оптимизации ротора магнитоэлектрической синхронной машины с полюсными наконечниками в форме дуги эллипса. Изготовление полюсных наконечников ротора с тангенциально намагниченными призматическими магнитами по форме в виде дуги эллипса позволяет увеличить основную гармонику нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора и уменьшить содержание высших гармоник в сравнении с полюсными наконечниками, изготовленными в виде дуги окружности;

2) выполнен расчет оптимальных размеров элементов ротора с тангенциально намагниченными призматическими магнитами для четырехполюсной синхронной машины, моделирование магнитного поля выполнено в программе *FEMM*, для решения

оптимизационной задачи использован метод нулевого порядка;

3) для четырехполюсной СМПМ с полюсными наконечниками по форме в виде дуги окружности и дуги эллипса получены графики распределения нормальной составляющей магнитной индукции вдоль внутренней окружности сердечника статора. При использовании полюсных наконечников по форме в виде дуги эллипса расчетное значение основной гармоники нормальной составляющей магнитной индукции больше на 6 % в сравнении с полюсными наконечниками, изготовленными в виде дуги окружности;

4) изготовлен макетный образец четырехполюсной электрической машины с постоянными магнитами на роторе. При испытании макетного образца на холостом ходу получены кривые фазных ЭДС, близкие по форме к синусоидальным.

#### Список источников / References

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 349 с. ISBN 978-5-469-01381-5. EDN: QMJUHP.  
 Vol'dek A. I., Popov V. V. Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC machines]. Saint Petersburg, 2008. 349 p. ISBN 978-5-469-01381-5. EDN: QMJUHP. (In Russ.).
2. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. Burlington: Newnes, 2013. 440 p. ISBN-13: 978-0-7506-4718-2, ISBN-10: 0-7506-4718-3.
3. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая школа, 1990. 416 с. ISBN 5-06-000719-7.  
 But D. A. Beskontaktnyye elektricheskiye mashiny [Non-contact electric machines]. Moscow, 1990. 416 p. ISBN 5-06-000719-7. (In Russ.).
4. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 280 с. ISBN 5-283-00556-9.  
 Balagurov V. A., Galteev F. F. Elektricheskiye generatory s postoyannymi magnitami [Electric generators with permanent magnets]. Moscow, 1988. 280 p. ISBN 5-283-00556-9. (In Russ.).
5. Кулешов Е. В., Сергеев В. Д. Быстроходный магнитоэлектрический синхронный ветрогенератор // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: материалы 8-й Всерос. науч.-тех. конф., Омск, 28–31 октября 2003 г. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2003. С. 338–344. EDN: THTFUT.  
 Kuleshov E. V., Sergeev V. D. Bystrokhodnyy magnitoelektricheskiy sinkhronnyy vetrogenerator [High-speed

magnetolectric synchronous wind generator] // *Sovremennyye Tendentsii v Razviti i Konstruirovani i Kollektornykh i Drugikh Elektromekhanicheskikh Preobrazovateley Energii*. Omsk, 2003. P. 338–344. EDN: THTFUT. (In Russ.).

6. Татевосян А. А. Научные основы проектирования оптимальных конструкций тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38. EDN: OKNPKC.

Tatevosyan A. A. Nauchnyye osnovy proyektirovaniya optimal'nykh konstruktsey tikhokhodnykh sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami dlya vetroenergeticheskikh ustanovok [Scientific basis for design low-speed synchronous permanent magnet generators for wind power plants]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 1 (175). P. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38. EDN: OKNPKC. (In Russ.).

7. Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К. Проектирование электромашин с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2020. Т. 177, № 4. С. 3–10. EDN: NKFWTH.

Gecha V. Ya., Zakharenko A. B., Nadkin A. K. Proyektirovaniye elektromashiny s postoyannymi magnitami, namagnichennymi po skheme Khal'bakha [Designing an electrical machine with permanent magnets magnetized according to halbach scheme]. Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ. *Electromechanical Matters. VNIIEМ Studies*. 2020. Vol. 177, no. 4. P. 3–10. EDN: NKFWTH. (In Russ.).

8. Шумов Ю. Н., Сафонов А. С. Сверхскоростные и ультраскоростные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов // Электричество. 2014. № 3. С. 35–42. EDN: RWHHDD.

Shumov Yu. N., Safonov A. S. Sverhskorostnye i ul'traskorostnye sinkhronnye mashiny s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov [Superhigh and ultrahighspeed synchronous machines excited from permanent magnets: state, design features, and development prospects]. *Elektrichestvo*. 2014. No. 3. P. 35–42. EDN: RWHHDD. (In Russ.).

9. Yusuke Miyajima. Brushless motor with permanent magnet rotor with magnetic poles with flux blocking parts/through holes towards the shaft forming angles. US patent 10,284,037B2; filed April 28th, 2015; published May 7th, 2019.

10. Вавилов В. Е. Выбор магнитной системы ротора электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 26–29. EDN: YNLWIH.

Vavilov V. E. Vybora magnitnoy sistemy rotora elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Selection of magnetic system of rotor of energy electromechanical converters with high-coercive permanent magnets]. Vestnik mashinostroyeniya. *Russian Engineering Research*. 2018. No. 1. P. 26–29. EDN: YNLWIH. (In Russ.).

11. Магин В. В. Особенности проектирования роторов малолучных синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 144, № 1. С. 3–15. EDN: UXLBTF.

Magin V. V. Osobennosti proyektirovaniya rotorov maloshchmnykh sinkhronnykh dvigateley s vzbuzhdeniyem ot postoyannykh magnitov [Design features of rotors of low-noise asynchronous motors with excitation from permanent magnets]. Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ. *Electromechanical Matters. VNIIEМ Studies*. 2015. Vol. 144, no. 1. P. 3–15. EDN: UXLBTF. (In Russ.).

12. Sato T., Igarashi H., Takahashi S. [et al.] Shape optimization of rotor in interior permanent magnet motor based on topology. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 135, no. 3. P. 291–298. DOI: 10.1541/ieejias.135.291.

13. Ishikawa T., Watanabe T., Kurita N. Effect of cleaning level on topology optimization of permanent magnet synchronous

generator. *IEEE Journal of Industry Applications*. 2017. Vol. 6, no. 6. P. 416–421. DOI: 10.1541/ieejia.6.416.

14. Karnavas Y., Chasiotis I., Peponakis E. Permanent magnet synchronous motor design using grey wolf optimizer algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2016. Vol. 6, no. 3. P. 1353–1362. DOI: 10.11591/ijece.v6i3.9771.

15. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. [и др.]. Оптимизация величины неравномерного воздушного зазора синхронной машины с постоянными магнитами на роторе // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 112–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118. EDN: RAPVDG.

Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu. [et al.]. Optimizatsiya velichiny neravnomernogo vozdušnogo zazora sinkhronnoy mashiny s postoyannymi magnitami na rotore [Uneven air gap optimization of synchronous machine with permanent rotor magnets]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 112–118. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-112-118. EDN: RAPVDG. (In Russ.).

16. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Милютин А. Ю. Оптимизация полюсных наконечников ротора синхронной машины с постоянными магнитами // Известия Транссиба. 2023. № 4 (56). С. 113–120. EDN: AYREDN.

Kharlamov V. V., Moskalev Yu. V., Milyutin A. Yu. Optimizatsiya polyusnykh nakonechnikov rotora sinkhronnoy mashiny s postoyannymi magnitami [Optimization of rotor pole tips synchronous machine with permanent magnets]. Izvestiya Transsiba. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 4 (56). P. 113–120. EDN: AYREDN. (In Russ.).

17. Finite element method magnetics. URL: <http://www.femm.info/> (accessed: 15.01.2025).

18. Borne P., Popescu D., Filip F. [et al.]. Optimization in engineering sciences: exact methods. London: Wiley, 2013. 307 p. ISBN 9781848214323. DOI: 10.1002/9781118577899.

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

**МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 1422-1951

AuthorID (РИНЦ): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Адрес для переписки: yuriyvm@mail.ru

**МИЛЮТИН Алексей Юрьевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 3677-7130

AuthorID (РИНЦ): 1150404

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

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

Статья поступила в редакцию 24.01.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2025; принята к публикации 06.05.2025.

**KHARLAMOV Viktor Vasilyevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5093-8463

AuthorID (RSCI): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Correspondence address: emoe@omgups.ru

**MOSKALEV Yuriy Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 1422-1951

AuthorID (RSCI): 657144

ORCID: 0000-0002-0970-937X

AuthorID (SCOPUS): 57200088110

Correspondence address: yuriyvm@mail.ru

**MILYUTIN Aleksey Yur'yevich**, Postgraduate of the Electrical Machines and General Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 3677-7130

AuthorID (RSCI): 1150404

Correspondence address: emoe@omgups.ru

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

The article was submitted 24.01.2025; approved after reviewing 27.02.2025; accepted for publication 06.05.2025.

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ ONLINE МОНИТОРИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В СОПОСТАВЛЕНИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

И. В. Ярошенко<sup>1</sup>, В. В. Носенко<sup>1</sup>, М. С. Алтунина<sup>1</sup>, Ю. П. Аксенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Шахтинский автодорожный институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, г. Шахты  
<sup>2</sup>ООО «Высоковольтные измерительные комплексы и системы», г. Балаково

Принятые в практике диагностики турбогенераторов измерения частичных разрядов и спектрального анализа вибрации в разное время и часто разными людьми — малоинформативно. Намного выше информативность при одновременном измерении в одной точке и разрядов, и вибрации, что позволяет увидеть как синергию «вибраявлений и разрядов», так и обратную синергию «разрядов и вибраявлений». Анализ распределения магнитного поля по поверхности корпуса генератора позволяет выявлять результат «работы» разрядов и вибрации, определять их воздействие на шины и токоведущие элементы турбогенераторов. В работе даны практические примеры определения зон дефектов по указанному методу и подтверждение их при визуально-инструментальном осмотре во время ремонта.

**Ключевые слова:** диагностика, мониторинг, короткозамкнутый контур, амплитуда магнитного поля, вибраявления, разряды, спектр гармоник.

**Для цитирования:** Ярошенко И. В., Носенко В. В., Алтунина М. С., Аксенов Ю. П. Информативность online мониторинга параметров технического состояния турбогенераторов в сопоставлении с результатами визуального контроля // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 72–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-72-81. EDN: HNXVOD.



© Ярошенко И. В., Носенко В. В., Алтунина М. С., Аксенов Ю. П., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## INFORMATIVE VALUE OF ONLINE MONITORING OF TURBO GENERATOR TECHNICAL CONDITION PARAMETERS COMPARED TO VISUAL INSPECTION

I. V. Yaroshenko<sup>1</sup>, V. V. Nosenko<sup>1</sup>, M. S. Altunina<sup>1</sup>, Yu. P. Aksenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty, Russia  
<sup>2</sup>LLC "High voltage measuring complexes and systems", Balakovo, Russia

Measurements of partial discharge amplitudes and spectral analysis of vibration at different times and often by different people are poorly informative, which are accepted in the practice of turbine generator diagnostics. The information content is much higher when both discharges and vibrations are measured at the same point, this allows you to see both the synergy of "vibration phenomena and discharges" and the reverse synergy of "discharges and vibration phenomena". And the analysis of the distribution of the magnetic field over the surface of the generator housing makes it possible to identify the result of the "operation" of the discharges and vibration. To determine their effect on tires and current-carrying elements of turbo generators the paper provides practical examples of determining defect zones using this method and confirming them during visual and instrumental inspection during repairs.

**Keywords:** diagnostics, monitoring, short circuit, magnetic field amplitude, vibration phenomena, discharges, harmonic spectrum.



### Актуальность

В практике эксплуатации турбогенераторов распространенным является раздельное измерение частичных разрядов (ЧР) в изоляции и вибрации в разных участках статорной обмотки [1–3]. Как показано в данной работе, более информативным является локация (измерение в одной зоне) одновременно нескольких параметров. Многолетний опыт авторов по анализу информативности параметров показывает, что измерения только «амплитудных» значений (кажущегося заряда ЧР, виброперемещений) малоинформативны. Применение новых методов диагностирования «тонких» параметров ВИБРО (энергия виброперемещения, определяемая по спектральному анализу после Фурье преобразования) и разрядных явлений [4, 5], а также характеристик магнитного поля в одной зоне позволяет получить более достоверную информацию, а также оценку корреляции явлений в данном дефекте. В работе будет показана:

— высокая информативность комплексного online диагностирования при одновременном измерении в одной зоне вибрационного спектра (гармонического анализа), функции распределения амплитуд разрядов и их числа, а также спектра токов на поверхности щитов и корпуса, по которым определяется амплитуда осевой составляющей магнитного поля и признаки образования КЗ-контура;

— учет синергии явлений, например, воздействия «виброявлений — на разряды», но также и обратного воздействия «разрядов — на вибрацию», когда сначала появляются искровые процессы в магнитной системе генератора или элементах ее крепления (стяжных призмах, нажимных плитах, пакетах активной стали), затем образуется контур с токами в несколько килоампер, который, в свою очередь, начинает влиять на вибрацию;

— необходимость анализа распределений спектра магнитного поля на поверхности корпуса, так как его значительное изменение говорит об образовании КЗ-контура, а также ведет к появлению новых силовых воздействий на шины и токонесущие узлы турбогенераторов (ТГ), т.е. обратное влияние ЭРА (частичных разрядов ЧР, искрений, поверхностных, пазовых, разрядов в роторе) на ВИБРО, хотя в основе процесса была вибрация, которая привела к разрядам, образованию контура и усилению вибрации.

Следует подчеркнуть, что надежность проведенных измерений, локация зон и комплексного определения видов дефектов подтверждена данными визуального контроля во время ремонта (рис. 1б).

Целью работы является обоснование различных диагностических параметров, их взаимосвязи для последующего определения технического состояния и критериев его оценки по каждому параметру. Кроме того, данные работы показывают, что имеет место достоверное количественное определение и локализация дефекта. При этом определение технического состояния только по одному линейному

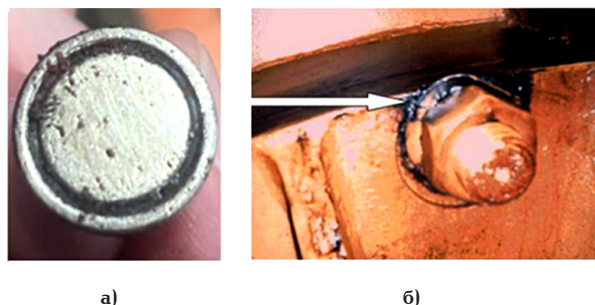


Рис. 1. Последствия вибрации и образования КЗ-контуров с образованием повреждения сердечника:

а — мелкодисперсная пыль от истирания листов активной стали на испытуемом ТГ; б — подгары на гайках стяжной призмы и признаки ослабления крепления нажимной плиты (ТВВ-1000/2 ЮУАЭС)

**Fig. 1. Consequences of vibration and the formation of short-circuit circuits with the formation of core damage: a — fine dust from the abrasion of active steel sheets on the test TG; б — fire on the nuts of the clamping prism and signs of loosening of the pressure plate attachment (TVV-1000/2 of the South Ukrainian NPP)**

параметру (амплитуде импульса ЧР и виброперемещению), тем более снятому в разное время [6, 7], может привести к ошибке в определении степени развитости (опасности) дефекта.

### 1. Средства и методы определения технического состояния ТГ

*Параметры, определяющие техническое состояние*

1) воздействующие факторы [8]:

— режим работы ТГ (активная мощность —  $P$ , реактивная мощность —  $Q$ );

— амплитуда  $A_{100}$  — амплитуда спектральной линии на частоте 100 Гц (частоте основного взаимодействия пондеромоторных сил в генераторе);

2) последствия от ВИБРО воздействий:

— виброудары — дискриминант  $\delta = \Sigma P_{\text{ч.г.}} / P_{100\text{Гц}}$ , о.е. — определяющий изменение спектрального состава за счет вклада от высших гармоник (200, 300 Гц и т.д.) — определяет виброударные воздействия на сердечник.

— деструкция (разрушение) — дискриминант  $\Delta = \Sigma_{\text{и.г.}} - \Sigma_{\text{ч.г.}}$ , дБ — усредненная мера деструктивного воздействия определяется энергией интергармоник, которые возникают в дефекте из-за микрополюсов в вибрирующем узле;

3) электроразрядные явления [9]:

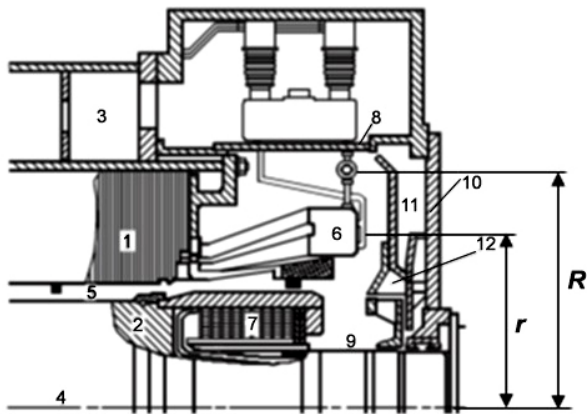
— амплитуда импульса разряда —  $Q_{\text{ЭРА}}$ , мВ;

— мощность ЭРА —  $P_{\text{ЭРА}}$ , о.е.;

— число импульсов с данной амплитудой  $n$ , импульсов за период промышленной частоты 50 Гц. Для построения зависимости  $n(Q_{\text{ЭРА}})$ ;

4) магнитное поле (признак формирования КЗ-контура):

— амплитуда магнитного поля по первой гармонике —  $A_{30\text{Гц}}$ ;



**Рис. 2. Узлы активной части в торцевой зоне, в которых вероятно появление дефектов.**  
**Конструкция торцевой зоны турбогенератора ТВВ-500-2ЕУЗ:**  
 1 — сердечник статора; 2 — сердечник ротора;  
 3 — вентиляционные каналы; 4 — ось вращения ротора;  
 5 — воздушный зазор; 6 — лобовая часть обмотки статора;  
 7 — лобовая часть обмотки ротора; 8 — кожух; 9 — вал;  
 10 — торцевой щит; 11 — выступы газового канала;  
 12 — вентиляционный узел

**Fig. 2. Nodes of the active part in the end zone where defects are likely to occur. The design of the end zone of the TVV-500-2EUZ turbogenerator:**  
 1 — stator core; 2 — rotor core; 3 — ventilation ducts;  
 4 — axis of rotation of the rotor; 5 — air gap; 6 — frontal part of the stator winding; 7 — frontal part of the rotor winding;  
 8 — casing; 9 — shaft; 10 — end shield; 11 — projections of the gas duct; 12 — ventilation unit

— признак КЗ-контура  $\mu = \frac{\sum A_{\text{нечет. гарм.}}}{A_{50}}$  (при отсутствии КЗ-контура  $\mu < 1,2$ ; критический контур при  $\mu > 5$ ).

Конструкция (поперечное сечение) турбогенератора со стороны «В» показана на рис. 2 для следующих зон:

— по большому радиусу  $R$  — контроль вибрации нажимной плиты, шин и головок стержней, ЧР в изоляции;

— по малому радиусу  $r$  — выход стержней из пазов, зубцы — искрения;

— по корпусу — для определения технического состояния сердечника.

Измерения проводились по большому числу точек (60–80) размещения датчика на щитах напротив шин и по корпусу. В каждой точке измерений фиксировались признаки ЭРА [10], а также спектр при измерении вибродатчиком, по которому определялись амплитуды спектральных линий, включая:

— 1-ю гармонику, которая определяет величину магнитного поля, а по 2-й гармонике фиксируются амплитуды виброперемещений;

— из набора четных гармоник, а также интергармоник рассчитываются диагностические параметры ( $\delta$  — виброударные воздействия и  $\Delta$  — деструкция).

#### Средства проведения диагностирования

Техническое состояние определялось при использовании «Системы непрерывного мониторинга — СМиД-1Г» и переносным комплексом «ДКЧР2М», которые позволяют контролировать в ручном или автоматическом режиме параметры ЭРА и ВИБРО. СМиД включает в себя шесть комбинированных

датчиков ЭРА и ВИБРО со своей микропроцессорной системой обработки данных и передачи их на серверный шкаф в цифровом виде, где происходит дальнейшая обработка данных по формулам, приведенным выше (для ВИБРО — это результаты Фурье преобразования виброскорости, для ЭРА — это зависимости  $p(Q_{\text{ЭРА}})$ ). ДКЧР-2М включает в себя набор датчиков для фиксации и локации ЭРА и ВИБРО на различных частотах (для ЭРА от 100 кГц до 100 МГц, для ВИБРО от 0,8 Гц до 10 кГц, с записью в цифровой высокочастотный осциллограф и обработкой данных в компьютере после измерений). Датчики на магнитной основе устанавливаются в корпус генератора.

1. Преимуществом «СМиД» является возможность длительного анализа (трендов) при одновременном контроле ВИБРО, ЭРА параметров и магнитного поля при дневном и ночном изменении активной и реактивной нагрузки. Это позволяет определить особенности дефекта. Недостаток — ограниченное число датчиков. Так как изменение технического состояния в зоне происходит за время — месяцы, то «СМиД» не позволяет определить вне зоны чувствительности датчика вновь возникший дефект.

2. Преимуществом «ДКЧР-2М» является возможность локации зон дефектов по ~80–90 точкам и комплексной оценке технического состояния лобовых и пазовых частей. Недостаток: эти измерения проводятся в течение короткого времени (часы) и не определяют динамику изменений параметров дефектов по разовым измерениям через несколько месяцев.

3. Оптимальным для обеспечения полной информативности датчика может быть сочетание «Системы мониторинга» и периодического (один раз в полгода) использования переносного диагностического комплекса [11, 12].

#### Особенности явлений и их синергия

Данные для анализа нами получены в разные годы при измерениях на генераторах ТВВ-500-2 Курской АЭС ТГ-5 и ТГ-8, Ленинградской АЭС Г-7, Смоленской АЭС Г-4, ТВВ-1000-2 ТГ-3 Калининской АЭС, ТВВ-100-4 Балаковской АЭС ТГ-1 и ТГ-3, ТВВ-800-2 НВГРЭС ТГ-1. Ниже приводятся подходы к проведению измерений и анализу явлений в дефектах. Это показано на рис. 2.

Сценарий появления и развития дефекта в статоре. Старт развития дефекта обусловлен возникновением механических явлений, определяемых виброперемещениями —  $A_{100}$  и виброударами —  $\delta$ , [13] под действием последних возникают деструктивные процессы —  $\Delta$ , что, в свою очередь, приводит к возникновению электроразрядных (искровых) явлений. По факту образования контактов между металлическими частями возникают КЗ-контуры, изменяющие картину магнитных полей:

1) вибрационные явления. Анализ проводился по контролю спектра с оценкой амплитуды спектральной линии 100 Гц ( $A_{100\text{Гц}}$ ). При этом получено:

— доминирование линии 100 Гц (при минимальных значениях других четных гармоник 200, 300... Гц), а также отсутствие интергармоник означает свободные колебания узла без механических потерь и диссипации;

— четные высокие гармоники (200, 400 Гц и т.д.) означают появление неупругих виброударов, приводящих к механическим повреждениям;

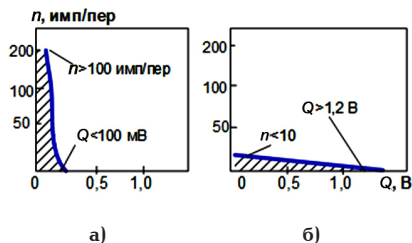


Рис. 3. Распознавание формы разряда по виду кривой  $n(Q_{ЭРА})$ :

а — вид  $n(Q)$  для формы, соответствующей искрениям, где  $Q$  — min, величина  $n$  — max; б — вид  $n(Q)$  для ЧР (величины  $Q$  — max,  $n$  — min)

Fig. 3. Description of the formulas of the rank according to the type of crooked arm  $n(Q_{ЭРА})$ : а — type of  $n(Q)$  — min, the corresponding search, somewhere  $Q$  — min, somewhere  $n$  — max; б — type of  $n(Q)$  for the partial discharge (the value of  $Q$  — max,  $n$  — min)

— наличие интергармоник (для  $\Delta > 5$  дБ) указывает на появление необратимых деструкционных (разрушающих) явлений в зоне вибрации.

Процесс деградации сердечника начинается со снижения среднего давления прессовки и появления местных ослаблений прессовки [14]. Это приводит к усталостным явлениям, истиранию листов и выходу дегтеобразных продуктов. При возникновении фреттинг-коррозии появляется вибрация листов активной стали в торце.

Скольжение листов способствует истиранию изоляционных лаковых покрытий и фреттинг-коррозии листов, это сопровождается искрениями. От истирания возникает «стальная пыль» (рис. 1а);

2) разрядные явления в изоляции конструкций. В межлистовой изоляции виброявления приводят к образованию неустойчивых гальванических контактов, в которых формируются искровые разряды [15]. В изоляции металлоконструкции из-за сильных механических воздействий возможно механическое повреждение изоляционных прокладок, это вызывает интенсивные искровые явления (пример на рис. 1б).

На рис. 3 показано, как по распределению  $n(Q_{ЭРА})$  определяется форма разрядных явлений (ЧР и искрения) [9, с. 30–44], а также максимальная амплитуда импульсов  $Q_{ЭРА}$  и число импульсов —  $n$ .

Повреждение изоляции происходит в несколько стадий:

— вначале механические отклонения из-за вибрации ( $A_{100}$  от разрушения креплений, что определяется деструкцией —  $\Delta$ );

— далее возникают разряды, фиксируемые по распределениям  $n(Q_{ЭРА})$ ;

3) явления в зоне КЗ-контура. Образование КЗ-контура происходит из-за механических воздействий, показанных на рис. 1:

— в узле «ласточкин хвост» в сердечнике;

— в металлоконструкциях креплений и прессовки торцевой зоны В.

Происходят виброудары (параметр —  $\delta$ ), это приводит к увеличению значения —  $\mu$ . Под действием виброударов и механических повреждений возникают гальванические контакты (рис. 1б), выделяется пыль (рис. 1а), происходит спекание, которые и образуют КЗ-контур. Вероятной причиной формирования КЗ-контуров является то, что



Рис. 4. Выход дегтеобразной массы в зоне вибрации и разрядов

Fig. 4. Tar-like mass output in the vibration and discharge zone

на участках креплений прессовки сердечника появляются замыкания деталей, из-за чего и возникают контуры. В контуре из-за влияния магнитного поля индуцируются токи.

## 2. Результаты диагностирования генератора ТВВ-800/2 НВГРЭС с использованием «Системы непрерывного мониторинга СМиД-1Г» и локация зон дефектов переносным комплексом «ДКЧР-2М»

Особенностью является взаимное влияние вибрационных и электроразрядных явлений, определяющее появление КЗ-контуров, которые, в свою очередь, формируют сильные магнитные поля. Поскольку имеет место синергия, необходимо определить зависимости параметров на щите «В» «по часам» — 12 точек установки датчиков. Поскольку проводился инструментально-визуальный контроль, на разобранном генераторе имелась возможность сопоставить данные локации диагностических параметров ( $A_{100}$ ,  $\delta$ ,  $\Delta$ ,  $P_{ч.р.}$  и  $\mu$ ) с визуальным представлением зоны со следами дефекта [16, 17].

### Техническое состояние рсточки и сердечника статора

Процесс развития ВИБРО явления. Начальными явлениями будут виброудары —  $\delta$ , о.е., которые приводят к деструкции  $\Delta$  (повреждения узлов крепления и прессовки пакетов, стяжных призм и стержней). Виброудары и деструкция приводят к нарушению межлистовой изоляции. Последнее определяет разряды в форме искрений. При выходе в ремонт и вскрытии генератора был произведен визуально-инструментальный контроль [18, 19]:

1) по пакетам локализованы значительные вибрационные процессы с наличием виброударов и деструкции узлов (предположительно в «ласточкиных хвостах» на стяжных призмах) и на металлоконструкциях креплений и прессовки со стороны «В» и «Т»), обнаружена артринная пыль от изоляции и металлическая стружка;

2) в пакетах сердечника деструкция происходит с появлением искровых разрядов. На генераторе они локализованы в двух поясах со стороны «В». Виброудары и деструкция обуславливают истирание пластин стали в пакетах, последнее приводит к появлению мелкодисперсной стальной пыли (рис. 1). Пыль обнаружена и на лобовых частях;

3) обнаружен участок рсточки, в котором есть признаки воздействий ВИБРО явлений, что обусловило выход черной дегтеобразной массы (рис. 4).

Смесь продуктов износа лака и полупроводящей пыли с маслом вследствие нагрева превращается в темную дегтеобразную массу с дисперсным железом. Вибрация листов сопровождается разрядными явлениями в форме искрений. Интенсивные искрения являются следствием деструкции узлов [20].

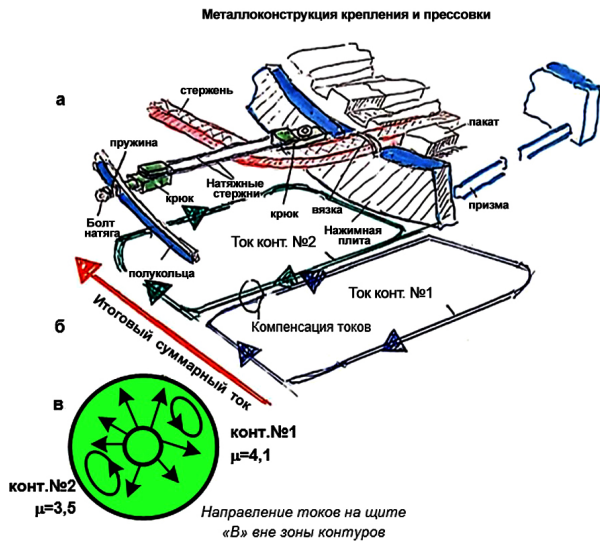


Рис. 5. Растекание тока на щите «В» по измерениям магнитного поля и признаков КЗ-контура —  $\mu$  при измерениях «ДКЧР» 30.01.24 перед демонтажом «СМиД-1Г»: а — условные обозначения конструкции прессовки; б — схематичное изображение протекания токов по элементам конструкции при образовании КЗ-контуров; в — результат измерений 30.01.24 перед демонтажом «СМиД-1Г»

Fig. 5. Current spreading on the shield "B" according to measurements of the magnetic field and signs of the short circuit during measurements of "HDR" on 30.01.24 before dismantling "Continuous Monitoring Systems-1G": а — symbols of the pressing design; б — schematic representation of the flow of currents through the structural elements during the formation of short-circuit circuits; в — measurement result on 30.01.24 before dismantling "Continuous Monitoring Systems-1G"

*Техническое состояние торцевой зоны на стороне «В»*

Наибольшая мощность ЭРА составляет ~5–9 о.е. (норма менее 1,0). Кроме этого фиксируется экстремально большое число импульсов  $n \sim 450$  имп/пер (норма  $n \sim 200$  имп/пер).

**3. Причины появления КЗ-контуров в торцевой зоне и возникновения anomalously сильных магнитных потоков на щите «В»**

*Конструкция торцевой зоны*

Конструкция прессовки сердечника заключается в использовании металлических конструкций (стяжных призм, нажимных плит) путем поджатия пакетов к нажимным плитам. Учитывая возможность повреждения изоляционных прокладок между элементами конструкции, возникает возможность замыкания и образования протекания токов в замкнутых узлах с возникновением сильных токов от магнитного потока в торцевой зоне. По данным [13, с. 3] величина токов в КЗ-контуре ~10–15 кА. Пример — рис. 5, где показано наличие в лобовой части значительного КЗ-контура (для  $\mu \sim 10$ ) на щите «В», на 5 час. В остальных зонах — штатное протекание тока:

- на корпусе — осевое;
- на щите — радиальное.

На рис. 5 условно показано протекание токов по двум соседним контурам и видно, что имеет место компенсация радиальных токов в зонах без дефектов.

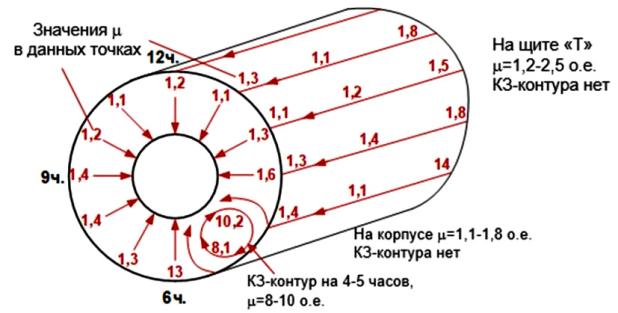


Рис. 6. Результат локации наличия КЗ-контуров, определяемых по значениям нечетных гармоник магнитного поля (картины растекания токов) из данных ППО (2020 г.), определяемого по дискриминанту  $\mu$ , значения которого по точкам контроля на щитах и корпусе

Fig. 6. The result of locating the presence of short-circuit circuits, determined by the values of the odd harmonics of the magnetic field (current spreading pattern) from the data of the TPO (2020), determined by the discriminant  $\mu$ , the values of which are based on the control points on the shields and the housing

*Результаты определения КЗ-контуров*

После ремонта фиксировался контур, показанный на рис. 6. В зоне КЗ-контуров возникает итоговый суммарный ток от нескольких цепей. Это обстоятельство и является причиной появления токов, протекающих по окружности. На других участках на щите направление тока по радиусу.

**4. Возможные причины («гиловинных») повреждений шин статора**

Для турбогенератора ТВВ-800-2 характерны дефекты, имеющие место в шинах на стороне «В», приводящие к повреждению. Это фиксировалось за время эксплуатации (~10 повреждений).

Вибрационное состояние шин ухудшается из-за следующих причин [21, 22]:

- возникновения резонансов в ее узлах с собственными частотами, близкими к частотам электромагнитных сил (100 Гц), это также приводит к росту повреждений участков шин;
- значительных виброперемещений шин под действием электромагнитных (пандеромоторных) сил — рост  $A_{100}$ .

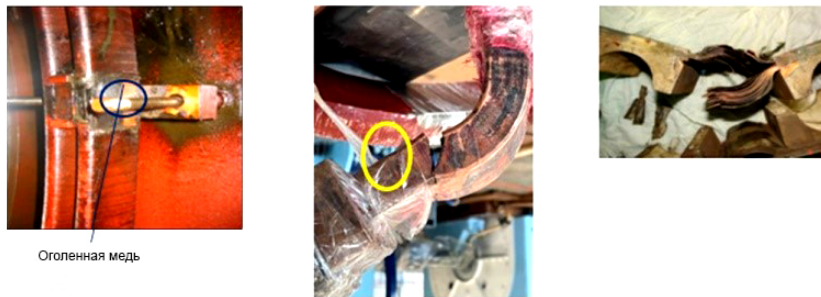
Возрастание вибрации приводит к значимым повреждениям в узлах конструкции. Анализ повреждений показывает, что возможны следующие варианты повреждений (рис. 7):

- первый вариант — повреждения изоляции шин в шинодержателях (а) ТВФ-110-2;
- второй вариант — разрушение цепей части шины токонесущего узла (б) ТВВ-800-2;
- третий вариант — повреждения гибких связей (в) ТВВ-1000-2.

*Описание механизма повреждения шин:*

1) развитие повреждений шин от вибрации (гиловинное повреждение).

Учитывая наличие в торцевой зоне сильных магнитных полей «В» на участке шин, расположенных между конструктивными опорами, по которым протекает рабочий ток  $\vec{I}$ , действует сила  $\vec{F} \sim \vec{I} \cdot \vec{B}$ . Поскольку ток по всем шинам одинаков, локальное увеличение действующей силы возможно за счет локального возрастания магнитного поля  $\vec{B}$ . Увеличение  $\vec{B}$  возможно за счет образования КЗ-контура.



Оголенная медь

Рис. 7. Варианты дефектов шин:

а — первый вариант — повреждение изоляции шин в креплении шинодержателя с истиранием изоляции (до меди); б — второй вариант — механическое разрушение выводной шины к линейному трансформатору ф. В, ТВВ-800. Диагностический признак — критический рост виброперемещений на частоте 100 Гц, разрядные процессы отсутствовали; в — третий вариант — повреждение гибкой перемычки 1С1 из-за растрескивания металла и металлического разрушения металла от вибрации и возникновения дуги в зонах разрыва

Fig. 7. Variants of tire defects:

а — the first option is damage to the tire insulation in the tire holder attachment with insulation abrasion (up to copper); б — the second option is mechanical destruction of the output busbar to the linear transformer ф. В, TVV-800. The diagnostic sign is a critical increase in vibration displacements at a frequency of 100 Hz, there were no discharge processes; в — the third option is damage to the 1C1 flexible bridge due to metal cracking and metal destruction from vibration and arcing in the rupture zones

Последовательность развития явлений в шинодержателе из-за увеличения вибрации шины:

— перемещения шины в креплениях шинодержателя из-за фрикционных явлений приводят к разрушению изоляции (а);

— появление участков с оголением меди может привести к перекрытию при коммутационных переключениях или при испытаниях;

2) анализ образования трещины в шине фазы (ф.) В при значительных виброперемещениях (параметр  $A_{100}$ ).

Вибродиагностика шин (за семь месяцев до внепланового ремонта) показала:

— фиксацию экстремальных виброперемещений на 6 час.,

— нулевые диагностические параметры ( $\delta$  и  $\Delta$ ).

В момент диагностирования имеет место отсутствие неупругих виброударов и деструктивных, разрушающих последствий.

Изоляция шин и элементарных пластин сердечника на момент измерений была в норме и разрядных явлений не фиксировалось.

#### Варианты виброконтроля отводных шин

Повреждения шин на отводах контролировались системами:

а) первый вариант — постоянный мониторинг Система «СМ-Электросила» с размещением вибродатчиков на шинах внутри корпуса [22, с. 7].

Датчики рис. 8 установлены выше наконечника выводов и размещены на каждой из сдвоенных шин (всего 4 шт.). При наличии одинаковых значений на шинах ф. А и С считается, что источником сигнала является шина ф. В.

Датчики — оптические акселерометры измерения виброускорения FOA-100E фиксировали виброперемещения (мкм). Указанными датчиками зафиксированы признаки повышенной вибрации на ф. В, на этом основании бригадой «СМ» проведен ремонт с заменой шин;

б) второй вариант — вибродиагностирование выполнялось переносной «Системой СМиД-1Г» с размещением вибродатчиков на внешней поверх-

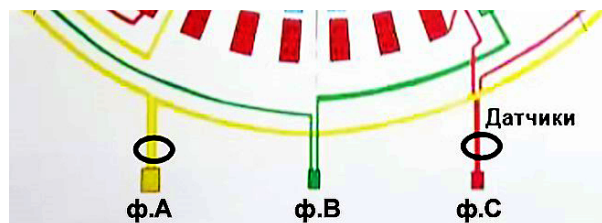


Рис. 8. Расположение датчиков мониторинга «СМ-Электросила» на шинах  
Fig. 8. The location of the "SM-Electrosila" monitoring sensors on the tires

ности щита «В» над вводами. Анализ по вибрации по варианту шин проводился на базе контроля спектра с оценкой амплитуды спектральной линии 100 Гц ( $A_{100\text{Гц}}$ ); было выявлено, что имеет место доминирование линии 100 Гц. Это означает, что присутствуют только свободные колебания узла без механических потерь и диссипации.

#### Вибродиагностирование шин

##### 1. Результат измерений.

Датчики устанавливались на щите. Измерения проведены в трех точках над ф. А, ф. В и ф. С, т.е. на 5, 6 и 7 час. При первых измерениях ППО (предпроектное обследование) имелась возможность контролировать вибрацию при различной выдаче реактивной мощности (от  $-20$  до  $+100$  МВАр). На рис. 9 показано изменение амплитудных линий 100 Гц в зависимости от  $Q$ . Максимальная вибрация фиксировалась при max выдаче  $Q = 100$  МВАр. По этой причине далее сопоставления (разных точек) проводились при близких значениях  $Q$ .

Особенности изменений амплитуд 100 Гц показаны на рис. 10 при проведении локации в точках (по часам) на щите «В». Для  $A_{100\text{Гц}}$  кривая 1 (данные 2021 г.) показывает, что max  $A_{100\text{Гц}}$  в точке на 6 час., т.е. над ф. В.

Амплитуда виброперемещений за время периодического «ручного» диагностирования с 2020 до 2024 гг. показана на рис. 11 для шин вводов «В»

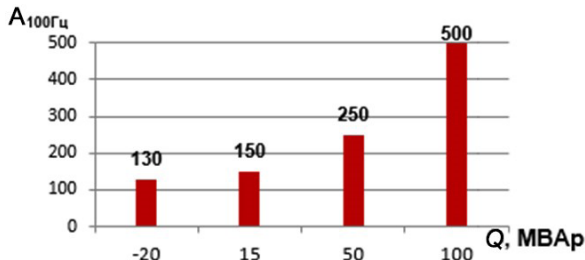


Рис. 9. Изменения виброскорости в зависимости от реактивной мощности

Fig. 9. Vibration velocity changes depending on reactive power



Рис. 10. Изменения амплитуды спектральной линии 100 Гц (виброперемещения) по точкам контроля (по часам) для измерений в ноябре 2021 г. (Q = 100 МВАр) — кривая 2, в апреле 2022 г. (Q = 89 МВАр) — кривая 3, а также виброэнергии на P<sub>100 Гц</sub> [8, с. 11, 26] — кривая 1

и «С». Из рис. 11 видно уменьшение A<sub>100</sub> после ремонта. На рис. 10 и 11 прослеживается история ремонтов:

- замена всех шин после ППО. Это видно на рис. 11 по броскам величин A<sub>100</sub> на ф. В и ф. С;
- ремонт с заменой только шины ф. В. Это видно на рис. 11 из сопоставления ф. В и ф. С в 2022 г.

2. Влияние изменений магнитного поля на тренды параметров.

Влияние тренда сильного магнитного поля на щите следует из сопоставления (кривые A<sub>50</sub>(t) и A<sub>100</sub>(t)) на рис. 11. Есть корреляция этих параметров, что показывает решающее влияние на тренд виброперемещения — A<sub>100</sub>(t), воздействия от магнитного поля — A<sub>50</sub>(t).

#### Механизм возможного повреждения шин

Из рис. 12 — распределение магнитного поля на щите «В» видно, что в области вводов имеет место сильное магнитное поле (A<sub>50</sub>). В этой зоне при аксиальном направлении магнитного поля для шин с радиальным направлением рабочего тока имеется сильное воздействие [23]. Таким образом, в магнитном поле имеются сильные силовые воздействия на участки шины. Это приводит к возникновению усталостных напряжений и механических повреждениям.

#### Заключение

Особенности технического состояния генератора определяются по данным локации «Системой



Рис. 11. Динамика изменений амплитуд спектральных линий A<sub>50</sub> для ф. В (ремонт всех фаз) и ф. С (ремонт одной фазы)

Fig. 11. Dynamics of changes in the amplitudes of spectral lines A<sub>50</sub> for ф. В (repair of all phases) and ф. С (repair of one phase)

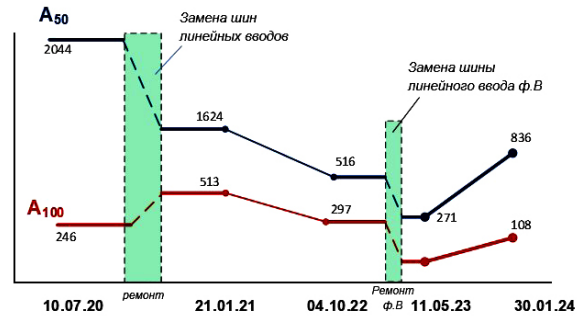


Рис. 12. Сопоставление динамики изменений амплитуд спектральных линий A<sub>50</sub> — величины магнитного поля, A<sub>100</sub> — значения виброперемещений

Fig. 12. Comparison of the dynamics of changes in the amplitudes of spectral lines A<sub>50</sub> — magnitudes of the magnetic field, A<sub>100</sub> — values of vibration displacements

непрерывного мониторинга (СМиД-1Г)» и периодически переносной «Системой диагностирования (ДКЧР-2)».

Важно, что в обоих случаях имеется возможность одновременного в одной зоне проведения измерения параметров ЭРА и ВИБРО. Что дает возможность проводить углубленный анализ и представление явлений по сопоставлению данных по электроразрядной активности (искрениям) в зависимости от вибрационных воздействий (деструкции и виброударов). А также позволяет выявить признаки КЗ-контура) по наличию сильного магнитного поля в локальной зоне.

1. Опыт длительного анализа результатов диагностирования большого парка турбогенераторов показывает, что типичный (наиболее вероятный) сценарий развития повреждений состоит из следующих стадий:

- старт — механические явления (виброперемещения, виброудары и т.д.);
- развитие механического явления — разрушение креплений (деструкция);
- появление искрений в повреждениях контактов или изоляции;
- появление ЧР в местах истирания изоляции при повышенной вибрации обмотки.

Анализ всей совокупности параметров явлений в дефекте позволяет получить комплексную оценку технического состояния узла статора в данной зоне.

Сопоставление данных локации по всем параметрам позволяет определить зоны критических де-

фектов, сопоставление видов параметров позволяет уточнить риск повреждения в ближайшее время. Указанные измерения, проводимые периодически, позволяют определить тренды, т.е. выполнить прогнозирование. Последнее дает возможность оценить по сценарию развития повреждения в каком временном участке развития находится дефект в данном узле. Следует указать, что анализ только одного явления не позволяет надежно определить расход ресурса, т.е. выполнять прогнозирование.

Важным является сопоставление критических параметров с данными визуального контроля.

Таким образом, результаты комплексного анализа подтверждаются данными визуального контроля.

#### Список источников / References

1. Аксенов Ю. П., Аксенов Д. П., Талапов С. Б. [и др.]. Применение диагностики для определения объема ремонта турбогенераторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 2. С. 27–36. EDN: KUZHTD.

Aksenov Yu. P., Aksenov D. P., Talapov S. B. [et al.]. Primenenie diagnostiki dlya opredeleniya ob'ema remonta turbogeneratorov [Diagnostics application for determining the repair rate of turbogenerators]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'. ELEKTRO. Electrical engineering. Electric power industry. Electrical engineering industry.* 2009. No. 2. P. 27–36. EDN: KUZHTD. (In Russ.).

2. Аксенов Ю. П., Ярошенко И. В. Комплексная диагностика турбогенераторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 2. С. 21–24. EDN: KVHYST.

Aksenov Yu. P., Yaroshenko I. V. Kompleksnaya diagnostika turbogeneratorov [Comprehensive diagnostics of turbogenerators]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'. ELEKTRO. Electrical engineering. Electric power industry. Electrical engineering industry.* 2006. No. 2. P. 21–24. EDN: KVHYST. (In Russ.).

3. Розум Т. И., Полищук В. И. Разработка архитектуры интеллектуальной системы функциональной диагностики турбогенератора // Вестник науки Сибири. 2015. № S1 (15). С. 83–86. EDN: UBTJTB.

Rozum T. I., Polishchuk V. I. Razrabotka arkhitektury intellektual'noy sistemy funktsional'noy diagnostiki turbogeneratora [Development of architecture of intellectual system of the turbogenerator functional diagnostics] // *Vestnik nauki Sibiri. The Siberian Science Bulletin.* 2015. No. S1 (15). P. 83–86. EDN: UBTJTB. (In Russ.).

4. Махутов Н. А., Назолин А. Л. Диагностика состояний и обоснование безопасности турбогенераторов критически и стратегически важных энергоустановок // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. № 2. С. 3–24. EDN: WFNCVL.

Makhutov N. A., Nazolin A. L. Diagnostika sostoyaniy i obosnovanie bezopasnosti turbogeneratorov kriticheski i strategicheski vazhnykh energoustanovok [Diagnostic of states and justification of safety of turbogenerators critically and strategically important power stations]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. Safety and emergencies problems.* 2016. No. 2. P. 3–24. EDN: WFNCVL. (In Russ.).

5. Филина О. А., Гиматдинов Ф. С., Елисеев Б. О. Некоторые аспекты технологии проведения предремонтной и послеремонтной диагностики турбогенераторов // Наука сегодня: история и современность: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вологда: ООО «Маркер», 2017. Т. 1. С. 87–89. EDN: ZUXDYT.

Filina O. A., Gimatdinov F. S., Eliseev B. O. Nekotorye aspekty tekhnologii provedeniya predremontnoy i posleremontnoy diagnostiki turbogeneratorov [Some aspects of the technology

of pre-repair and post-repair diagnostics of turbogenerators] // *Nauka Segodnya: Istoriya i Sovremennost'. Vologda, 2017. Vol. 1. P. 87–89. EDN: ZUXDYT. (In Russ.).*

6. Гончар Д. В., Якименко А. А. Диагностика состояния изоляции турбогенераторов измерением частичных разрядов // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: тр. XVII Междунар. конф. Крым, 2018. С. 8–10. EDN: YRHGRV.

Gonchar D. V., Yakimenko A. A. Diagnostika sostoyaniya izolyatsii turbogeneratorov izmereniem chastichnykh razryadov [Diagnostics of the insulation condition of turbogenerators by measuring partial discharges]. *Elektromekhanika, Elektrotehnologii, Elektrotehnicheskie Materialy i Komponenty.* Crimea, 2018. P. 8–10. EDN: YRHGRV. (In Russ.).

7. Ба Бораик А. М., Усачев А. Е., Ильдарханов Р. Г. [и др.]. Новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 41–53. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53. EDN: XWBLLNB.

Ba Boraik A. M., Usachev A. E., Il'darkhanov R. G. [et al.]. Novaya metodika opredeleniya razmerov i polozheniya defektov v izolyatsii obmotok statorov turbogeneratorov pri izmereniyakh v nikh chastichnykh razryadov [New method of determining size and provision of defects in the insulation of windings of stator of turbogenerators at measurement of partial discharges in them]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering Research. Equipment. Technology.* 2018. Vol. 20, no. 1-2. P. 41–53. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53. EDN: XWBLLNB. (In Russ.).

8. МР 1.2.1.13.0975–2014. Вибрационный контроль активной части турбогенераторов и электродвигателей. Введ. 01–09–2015. URL: <https://eshop.rosenergoatom.ru/> (дата обращения: 27.04.2025).

MR 1.2.1.13.0975–2014. Vibratsionnyy kontrol' aktivnoy chasti turbogeneratorov i elektrodvigateley [Vibration control of the active part of turbogenerators and electric motors]. URL: <https://eshop.rosenergoatom.ru/> (accessed: 27.04.2025). (In Russ.).

9. МУ 1.3.3.99.0036–2009. Диагностика изоляции вращающихся машин классов напряжения от 0,4 кВ до 24 кВ по характеристикам частичных разрядов. Введ. 01–12–2009. URL: <https://normativ.su/catalog/standart/1001/252725/> (дата обращения: 28.04.2025).

MU 1.3.3.99.0036–2009. Diagnostika izolyatsii vrashchayushchikhysya mashin klassov napryazheniya ot 0,4 kV do 24 kV po kharakteristikam chastichnykh razryadov [Diagnostics of the rotating machines insulation of voltage classes from 0.4 kV to 24 kV according to features of partial discharges]. URL: <https://normativ.su/catalog/standart/1001/252725/> (accessed: 28.04.2025). (In Russ.).

10. Круглова Т. Н., Ярошенко И. В., Работалов Н. Н. [и др.]. Интеллектуальный метод диагностирования турбогенератора на основе анализа разрядных явлений // Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. науч. семинара по тематике «Электроснабжение». Новочеркасск, 2018. С. 185–192. EDN: KERMLW.

Kruglova T. N., Yaroshenko I. V., Rabotalov N. N. [et al.]. Intellektual'nyy metod diagnostirovaniya turbogeneratora na osnove analiza razryadnykh yavleniy [An intelligent method for diagnosing a turbogenerator based on the analysis of discharge phenomena]. *Kibernetika Energeticheskikh System.* Novocherkassk, 2018. P. 185–192. EDN: KERMLW. (In Russ.).

11. Орехов Э. А., Абрамов В. В. Методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования // Энергоэксперт. 2020. № 2 (74). С. 16–19. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109. EDN: KJOSYW.

Orekhov E. A., Abramov V. V. Metody nerazrushayushchego kontrolya elektrotehnicheskogo oborudovaniya [Remote monitoring and control of the status of transformers in distribution

electrical networks]. *Energoekspert*. 2020. No. 2 (74). P. 16–19. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109. EDN: KJOSYW. (In Russ.).

12. Шевченко В. В. Прогнозирование эксплуатационного состояния турбогенераторов // *Электрика*. 2015. № 1. С. 3–7.

Shevchenko V. V. Prognozirovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya turbogeneratorov. [Forecasting the operational condition of turbogenerators]. *Elektrika*. 2015. No. 1. P. 3–7. (In Russ.).

13. Назолин А. Л. Обнаружение дефектов машин и механизмов циклического действия по временным и виброакустическим параметрам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2013. 32 с. EDN: ZOTMCH.

Nazolin A. L. Obnaruzhenie defektov mashin i mekhanizmov tsiklicheskogo deystviya po vremennym i vibroakusticheskim parametram avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Detection of defects in machines and mechanisms of cyclic action by temporal and vibroacoustic parameters]. Moscow, 2013. 32 p. EDN: ZOTMCH. (In Russ.).

14. Кузнецов Д. В. Развитие методов исследования процессов в узлах крепления сердечников статоров к корпусам турбогенераторов и совершенствование их диагностики в условиях эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 24 с. EDN: NKSZLH.

Kuznetsov D. V. Razvitie metodov issledovaniya protsessov v uzлах krepneniya serdechnikov statorov k korpusam turbogeneratorov i sovershenstvovanie ikh diagnostiki v usloviyakh ekspluatatsii. avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Development of methods for studying processes in the attachment points of stator cores to turbogenerator housings and improvement of their diagnostics under operating conditions]. Moscow, 2009. 24 p. EDN: NKSZLH. (In Russ.).

15. Назолин А. Л. Виброакустическая диагностика и ресурсосберегающая эксплуатация турбогенераторов // *Машины, технологии и материалы для современного машиностроения*: сб. тез. конф. Москва: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. С. 117. EDN: YTILEL.

Nazolin A. L. Vibroakusticheskaya diagnostika i resursosberegayushchaya ekspluatatsiya turbogeneratorov. [Vibroacoustic diagnostics and resource-saving operation of turbogenerators]. *Mashiny, Tekhnologii i Materialy dlya Sovremennoy Mashinostroeniya*. Moscow, 2018. P. 117. EDN: YTILEL. (In Russ.).

16. Кукис Д. В., Климова Т. Г., Тепикин Я. Е. [и др.]. Возможности и задачи непрерывного мониторинга параметров и состояния синхронных генераторов // *Энергия единой сети*. 2023. № 3-4 (70). С. 50–59. EDN: QSDRBK.

Kukis D. V., Klimova T. G., Tepikin Ya. E. [et al.]. Vozmozhnosti i zadachi nepreryvnogo monitoringa parametrov i sostoyaniya sinkhronnykh generatorov [The possibilities and tasks of continuous monitoring of the parameters and condition of synchronous generators]. *Energiya Edinoi Seti*. 2023. No. 3-4 (70). P. 50–59. EDN: QSDRBK. (In Russ.).

17. Боронин Д. А., Прокофьев А. Ю., Карелин В. С. [и др.]. Автоматизированная система мониторинга и предиктивной диагностики турбогенератора // *X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда»*: сб. тез. Санкт-Петербург: ООО «Издательский дом Недра», 2023. С. 17–18. EDN: CYHFVS.

Boronin D. A., Prokofev A. Yu., Karelin V. S. [et al.]. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i prediktivnoy diagnostiki turbogeneratora. [Automated system for monitoring and predictive diagnostics of a turbogenerator]. *X Mezhdunarodnaya Nauchno-prakticheskaya Konferentsiya Molodykh Uchenykh i Spetsialistov Atomnoy Otrasi "Komanda"*. Saint Petersburg, 2023. P. 17–18. EDN: CYHFVS. (In Russ.).

18. Лач С. Ю., Солёный С. В., Чабаненко А. В. Современные методы диагностики и мониторинга турбогенераторов во время работы, ремонта и технического обслуживания //

Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докл. III Междунар. форума. Санкт-Петербург, 2023. Т. 1. С. 244–246. EDN: EDVPQR.

Lach S. Yu., Soleny S. V., Chabanenko A. V. Sovremennyye metody diagnostiki i monitoringa turbogeneratorov vo vremya raboty, remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya [Modern methods for diagnostics and monitoring of turbogenerators during operation, repair and maintenance]. *Matematicheskie Metody i Modeli v Vysokotekhnologichnom Proizvodstve*. Saint Petersburg, 2023. Vol. 1. P. 244–246. EDN: EDVPQR. (In Russ.).

19. Разумов Р. В., Соловьев М. Ю., Михайлов А. В. Системы мониторинга высоковольтного энергетического оборудования: мониторинг частичных разрядов во вращающихся электрических машинах // *Релейная защита и автоматизация*. 2021. № 1 (42). С. 46–59. EDN: ARRTQR.

Razumov R. V., Solov'ev M. Yu., Mikhaylov A. V. Sistemy monitoringa vysokovol'nogo energeticheskogo oborudovaniya: monitoring chastichnykh razryadov vo vrashchayushchikhsya elektricheskikh mashinakh [Monitoring systems for high-voltage power equipment: monitoring partial discharges in rotating electrical machines]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. *Relay Protection and Automation*. 2021. No. 1 (42). P. 46–59. EDN: ARRTQR. (In Russ.).

20. Романов И. В. Ремонт по состоянию. Современные методы диагностики турбогенераторов // *Энергетик*. 2020. № 5. С. 30–32. EDN: WBTVAA.

Romanov I. V. Remont po sostoyaniyu. sovremennyye metody diagnostiki turbogeneratorov [Repair as required. Modern methods of turbine-type generators diagnostics]. *Energetik. Power & Electrical Engineering*. 2020. No. 5. P. 30–32. EDN: WBTVAA. (In Russ.).

21. Polishchuk V. I., Sergeev V. L. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic field sensor for turbogenerator diagnostics. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2015. Vol. 8, no. 2. P. 201–207. DOI: 10.17516/1997-1397-2015-8-2-201-207. EDN: VHQYWT.

22. Овчинников И. А., Попов И. В., Карелин В. С. [и др.]. Автоматизированная система мониторинга и предиктивной диагностики турбогенератора // *Электротехнические комплексы и системы: материалы II Всерос. конф. по электрическим машинам в рамках Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: ООО «Аэтерна», 2023. С. 3–23. EDN: JNMNIV.*

Ovchinnikov I. A., Popov I. V., Karelin V. S. [et al.]. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i prediktivnoy diagnostiki turbogeneratora. [Automated system for monitoring and predictive diagnostics of a turbogenerator]. *Elektrotekhnicheskie Kompleksy i Sistemy*. Ufa, 2023. P. 3–23. EDN: JNMNIV. (In Russ.).

23. Литвин А. С., Мальцев И. А. Анализ методов неразрушающей диагностики и контроля узлов и элементов электрических машин переменного тока // *Инновационные технологии: теория, инструменты, практика*. 2024. Т. 1. С. 409–416. EDN: KLFBJH.

Litvin A. S., Mal'tsev I. A. Analiz metodov nerazrushayushchey diagnostiki i kontrolya uzlov i elementov elektricheskikh mashin peremennogo toka [Analysis of methods of non-destructive diagnostics and control of units and elements of AC electrical machines]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika. Innovative Technologies: Theory, Tools, Practice*. 2024. Vol. 1. P. 409–416. EDN: KLFBJH. (In Russ.).

**ЯРОШЕНКО Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и автоматизации автодорожной отрасли Шахтинского 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 автодорожной отрасли Шахтинского автодорожного 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: vvnosenko@mail.ru

**АЛТУНИНА Мария Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры механизации и автоматизации автодорожной отрасли Шахтинского автодорожного 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

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

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 15.05.2025.

**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

Correspondence address: diacsnew@list.ru

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

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 22.04.2025; accepted for publication 15.05.2025.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, Е. В. Петрова,  
В. А. Деев, В. М. Троценко, В. Н. Горюнов, М. Ю. Николаев

Омский государственный технический университет, г. Омск

Вследствие растущего спроса на электроэнергию и износа существующей инфраструктуры, воздушные линии электропередачи во многих случаях вынужденно работают на пределе своих тепловых возможностей. Это стимулирует инженеров все чаще обращать внимание на учет погодных факторов, влияющих на температуру проводников, используя соответствующие математические модели. Тем самым обеспечивается возможность оперативно реагировать на изменения в тепловом режиме проводников.

В данной статье на основе уравнений теплового баланса произведен вывод аналитических выражений для расчета температуры изолированных и неизолированных проводов воздушных линий электропередачи. Представленная математическая модель подтверждена сравнением с методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе Ansys. Исследование также включало в себя комплексное изучение того, как температура окружающей среды, скорость ветра и атмосферное давление влияют на тепловое состояние проводника.

**Ключевые слова:** активное сопротивление, потери мощности, линия электропередачи, метеорологические факторы, температурный режим, изоляция, метод конечных элементов, пропускная способность.

**Для цитирования:** Криволапов В. А., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Деев В. А., Троценко В. М., Горюнов В. Н., Николаев М. Ю. Исследование влияния окружающей среды на пропускную способность воздушных линий электропередачи // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 82–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-82-88. EDN: LQPNMN.



© Криволапов В. А., Гиршин С. С., Петрова Е. В.,  
Деев В. А., Троценко В. М., Горюнов В. Н., Николаев М. Ю., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT ON THE CAPACITY OF OVERHEAD POWER LINES

V. A. Krivolapov, S. S. Girshin, E. V. Petrova,  
V. A. Deev, V. M. Trotsenko, V. N. Goryunov, M. Yu. Nikolayev

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Due to the growing demand for electricity and the deterioration of existing infrastructure, overhead power lines in many cases are forced to operate at the limit of their thermal capabilities. This encourages engineers to increasingly pay attention to the consideration of weather factors affecting the temperature of conductors, using appropriate mathematical models. This makes it possible to quickly respond to changes in the thermal regime of the conductors.

In this article, based on the equations of thermal balance, analytical expressions are derived for calculating the temperature of insulated and non-insulated wires of overhead power lines. The presented mathematical model is confirmed by comparison with the finite element method implemented in the Ansys software package. The study also included a comprehensive study of how ambient temperature, wind speed and atmospheric pressure affect the thermal state of the conductor.

**Keywords:** active resistance, power losses, power transmission line, meteorological factors, temperature regime, insulation, finite element method, throughput capacity.



### Введение

Несмотря на то, что в мире до сих пор проживает приблизительно 750 млн человек без доступа к электричеству [1], мировой спрос на электроэнергию неуклонно растет, что обусловлено такими факторами, как рост численности населения и благосостояния граждан, а также более активное применение различного электрооборудования в повседневной жизни [2].

Согласно долгосрочному прогнозу [3], к 2042 г. потребление электроэнергии в энергосистемах Российской Федерации достигнет 1449,72 млрд кВт·ч, а пиковое потребление электроэнергии возрастет до 208,24 млн кВт·ч. Этот рост позволяет электроэнергетической отрасли расширить свою роль в качестве значимого поставщика энергетических услуг во всех секторах экономики, особенно в секторах строительства и транспорта [4].

В то же время этот рост окажет серьезное влияние на существующую инфраструктуру электрических сетей, особенно учитывая высокий процент износа имеющегося оборудования в России [5]. Если данная проблема не будет решена своевременно, она может стать серьезным препятствием для экономического роста Российской Федерации.

В Распоряжении Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [6] для решения этой задачи указывается на необходимость сокращения потерь электроэнергии в электросетях до 7,3 % и обновления инфраструктуры электросетей.

### Математическая модель

Повышение токовых нагрузок на воздушные линии электропередачи неизбежно приводит к повышению температуры проводников, тем самым накладывая ограничения на пропускную способность линий. Для обеспечения надежной работы и безопасной эксплуатации проводов в различных условиях производители устанавливают конкретные рекомендации относительно верхних пределов рабочей температуры. Чтобы достичь максимальной возможной пропускной способности, оставаясь в пределах допустимых температур провода, необходимо учитывать множество факторов. Сюда входят не только присущие самому проводнику свойства, такие как составляющие его материалы, площадь поперечного сечения и электрическое сопротивление, но и скорость ветра, атмосферное давление, солнечная радиация и температура окружающей среды. Старение проводников, расширение металлов под воздействием тепла, быстрые колебания погодных условий и множество других влияющих факторов значительно усложняют математические модели, используемые для прогнозирования и анализа пропускной способности линий. В результате эти сложности вносят уровень неопределенности, который снижает точность моделей.

Для оценки максимальных токовых нагрузок используются следующие математические модели: IEEE 738 [7], CIGRE 601 [8] и стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.55.143-2013 [9].

Определение предельной пропускной способности может быть реализовано либо путем расчета длительно допустимого тока, либо непосредственно определением температуры проводника и контролем этого значения ниже допустимого [10].

На территории Российской Федерации широкое распространение в сетях до 35 кВ получили провода с изолирующим слоем [11]. Но перечисленные выше методы предназначены только для расчетов неизолированных проводников. Следовательно, это ограничение подчеркивает необходимость дополнительных исследований для создания соответствующих методов, адаптированных к уникальным требованиям изолированных проводов.

Перечисленные выше стандарты поддерживают концепцию теплового баланса, которая предполагает, что тепло, поглощаемое проводником, компенсируется теплом, рассеянным в процессе охлаждения.

Численно тепловой баланс выражается следующей формулой:

$$P_s + P_j = P_c + P_r, \quad (1)$$

где  $P_s$  — интенсивность солнечной радиации, Вт/м;  $P_j$  — нагрузочные потери мощности, Вт/м;  $P_c$  — мощность, отдаваемая путем конвективного теплообмена, Вт/м;  $P_r$  — мощность, отдаваемая путем излучения, Вт/м.

Конвективные потери тепла проводника зависят от разницы температур между проводником и окружающей средой, а также от скорости и направления ветра. При скорости ветра свыше 0,2–0,6 м/с конвекцию следует принимать вынужденной.

Составляющие теплового баланса можно расписать согласно [8] и [12]:

$$P_s + d_{np} \cdot A_s \cdot q_{солн}, \quad (2)$$

$$P_j = \frac{\Delta P_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot T_{внеш} - 273,15 \cdot \alpha_0]}{1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{уз}}, \quad (3)$$

$$P_c = d_{np} \cdot \alpha_{выш} \cdot \pi \cdot [T_{внеш} - T_{окр}], \quad (4)$$

$$P_r = d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot [T_{внеш}^4 - T_{окр}^4], \quad (5)$$

где  $d_{np}$  — диаметр провода, м;  $A_s$  — поглощательная способность провода для солнечного излучения;  $q_{солн}$  — плотность потока солнечной радиации на провод, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Delta P_0$  — потери активной мощности, рассчитанные по сопротивлению, приведенному к 0 °С, Вт/м;  $\alpha_0$  — температурный коэффициент электрического сопротивления при 0 °С, 1/°С;  $T_{внеш}$  — абсолютная температура внешней поверх-

ности провода, К;  $S_{из}$  — тепловое сопротивление изоляции, мК/Вт;  $\alpha_{вын}$  — коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{окр}$  — абсолютная температура окружающей среды, К;  $\varepsilon$  — коэффициент излучения;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  — постоянная излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Путем подстановки уравнений 2–5 в уравнение теплового баланса получим:

$$\frac{\Delta P_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot T_{внеш} - 273,15 \cdot \alpha_0]}{1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}} + d_{np} \cdot A_s \cdot q_{соин} = d_{np} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi \cdot [T_{внеш} - T_{окр}] + d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot [T_{внеш}^4 - T_{окр}^4]. \quad (6)$$

Разделим обе части уравнения на  $d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0$ :

$$\frac{\Delta P_0 \cdot [1 - 273,15 \cdot \alpha_0]}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} + \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_0 \cdot T_{внеш}}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} + \frac{A_s \cdot q_{соин}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot C_0} = \frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon \cdot C_0} \cdot [T_{внеш} - T_{окр}] + T_{внеш}^4 - T_{окр}^4. \quad (7)$$

Перенесем все переменные в одну сторону уравнения и вынесем общий коэффициент  $T_{внеш}$ :

$$T_{внеш}^4 + \left[ \frac{\frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_0}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]}}{T_{внеш}} \right] \cdot T_{внеш} + \left[ \frac{-T_{окр}^4 - \frac{A_s \cdot q_{соин}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot [1 - 273,15 \cdot \alpha_0]}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} - \frac{\alpha_{вын} \cdot T_{окр}}{\varepsilon \cdot C_0}}{T_{внеш}} \right] = 0. \quad (8)$$

Приведем выражение к уравнению четвертой степени, используя вспомогательные коэффициенты  $A_1$  и  $A_0$ :

$$T_{внеш}^4 + A_1 \cdot T_{внеш} + A_0 = 0, \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_0}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]}, \quad (10)$$

$$A_0 = -T_{окр}^4 - \frac{A_s \cdot q_{соин}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot [1 - 273,15 \cdot \alpha_0]}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} - \frac{\alpha_{вын} \cdot T_{окр}}{\varepsilon \cdot C_0}. \quad (11)$$

Решить данное уравнение можно методом Феррари [13, с. 239], используя вспомогательный параметр  $\beta$ :

$$[T_{внеш}^2 + \beta]^2 - [2 \cdot \beta \cdot T_{внеш}^2 - A_1 \cdot T_{внеш} + \beta^2 - A_0] = 0. \quad (12)$$

Коэффициент  $\beta$  должен быть подобран так, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$A_1^2 - 8 \cdot \beta \cdot [\beta^2 - A_0] = -8 \cdot \beta^3 + 8 \cdot \beta \cdot A_0 + A_1^2 = \beta^3 - A_0 \cdot \beta - \frac{A_1^2}{8} = 0. \quad (13)$$

С помощью формулы Кардано [13, с. 235] найдем корни кубического уравнения:

$$\beta = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8}\right] + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8}\right]^2 + \frac{1}{27} \cdot [-A_0]^3}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8}\right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8}\right]^2 + \frac{1}{27} \cdot [-A_0]^3}} = \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} - \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}}. \quad (14)$$

Корни уравнения четвертой степени с найденным вспомогательным коэффициентом  $\beta$ :

$$\begin{cases} T_{внеш}^2 - \sqrt{2 \cdot \beta} \cdot T_{внеш} + \left[\beta + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}\right] = 0 \\ T_{внеш}^2 + \sqrt{2 \cdot \beta} \cdot T_{внеш} + \left[\beta - \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}\right] = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

С помощью дискриминанта найдем корни квадратных уравнений:

$$T_{внеш,2} = \frac{\sqrt{2 \cdot \beta} \pm \sqrt{2 \cdot \beta - 4 \cdot \left[\beta + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}\right]}}{2} = \frac{\sqrt{\beta} \pm \sqrt{-\frac{\beta}{2} - \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

$$T_{внеш,4} = \frac{-\sqrt{2 \cdot \beta} \pm \sqrt{2 \cdot \beta - 4 \cdot \left[\beta - \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}\right]}}{2} = -\frac{\sqrt{\beta} \pm \sqrt{-\frac{\beta}{2} + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}}}{\sqrt{2}}. \quad (17)$$

Искомым решением является один единственный корень. Путем многократных практических расчетов выведено, что 1-й, 2-й и 4-й корень находится в области либо отрицательных, либо комплексных чисел. Таким образом, единственно верным является третий корень:

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} + \sqrt{-\frac{\beta}{2} + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}}. \quad (18)$$

Уравнение, связывающее температуру поверхности провода и температуру жилы провода [12]:

$$\theta_{np} = \frac{T_{внеш} - 273,15 + \Delta P_0 \cdot S_{из}}{1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}}, \quad (19)$$

где  $\theta_{np}$  — температура жилы провода, °С.

### Сравнительный анализ

Выполним сравнительный анализ предложенной математической модели с методом конечных элементов для трехмерного объекта в программном обеспечении Ansys Fluid Flow (CFX).

Таблица 1. Параметры, принятые при проведении расчетов  
Table 1. Parameters accepted for calculations

Наименование и обозначение параметров	СИП-3 1×35-20
Сечение проводника $S$ , мм <sup>2</sup>	35
Погонное сопротивление провода при 20 °С $R_{20}$ , Ом/км	0,77
Диаметр жилы провода $d_1$ , мм	6,7
Внешний диаметр провода $d_2$ , мм	11,5
Коэффициент теплопроводности жилы $\lambda_{ж}$ , Вт/(м·К)	237
Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{из}$ , Вт/(м·К)	0,4
Температурный коэффициент сопротивления при 20 °С $\alpha_{20}$ , °С <sup>-1</sup>	0,00403
Коэффициент излучения $\epsilon$	0,8
Температура воздуха $\theta_{в}$ , °С	25
Атмосферное давление $P_{атм}$ , кПа	101,325
Скорость ветра $v$ , м/с	1
Коэффициент угла атаки ветра $k_v$	1
Удельная теплоемкость жилы $C_{ж}$ , Дж/(кг·°С)	903
Удельная теплоемкость изоляции $C_{из}$ , Дж/(кг·°С)	2300
Плотность жилы $\rho_{ж}$ , кг/м <sup>3</sup>	2702
Плотность изоляции $\rho_{из}$ , кг/м <sup>3</sup>	940

Модель включает в себя процессы теплообмена за счет конвекции и излучения, а также учитывает генерацию тепла внутри проводника из-за прохождения электрического тока. Модель также учитывает изменения сопротивления при изменении температуры жилы с учетом температурного коэффициента сопротивления. Для описания движения воздушных масс выбрана модель турбулентности Shear Stress Transport. Граничные условия включают скорость ветра 1 м/с и температуру окружающего воздуха 25 °С, солнечное излучение в данном исследовании не учитывалось. Для моделирования радиационных процессов применялся метод Monte-Carlo. Технические характеристики, используемые при расчете, представлены в табл. 1. Для упрощения расчетов не рассматривается многопроводочная структура проводника. Результаты трехмерного моделирования методом конечных элементов пред-

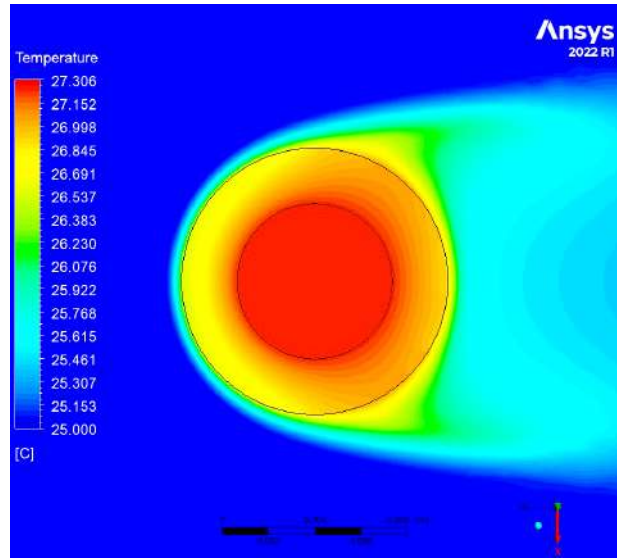


Рис. 1. Распределение температуры внутри проводника и окружающей его среды при силе тока 50 А  
Fig. 1. Temperature distribution inside the conductor and its surroundings at a 50 A current strength

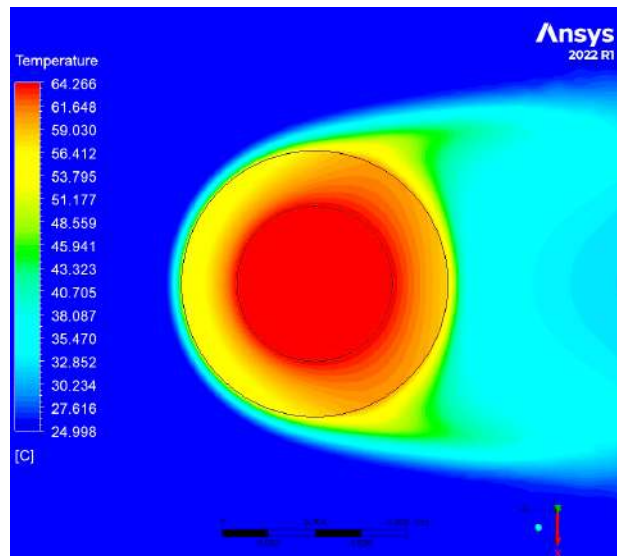


Рис. 2. Распределение температуры внутри проводника и окружающей его среды при силе тока 200 А  
Fig. 2. Temperature distribution inside the conductor and its surroundings at a 200 A current strength

Таблица 2. Результаты расчетов температуры жилы методом конечных элементов и представленной математической модели

Table 2. Calculation results of core temperature by finite element method and by presented mathematical model

Сила тока, А	Температура жилы, °С		Абсолютная погрешность $\Delta = \theta_{мм} - \theta_{МКЭ}$ , °С	Относительная погрешность $\delta = \Delta / \theta_{МКЭ} \cdot 100\%$ , %
	Представленная математическая модель $\theta_{мм}$	Метод конечных элементов $\theta_{МКЭ}$		
50	27,154	27,306	-0,152	-0,557
75	29,893	29,968	-0,075	-0,250
100	33,812	33,999	-0,187	-0,550
125	39,004	39,150	-0,146	-0,373
150	45,591	45,887	-0,296	-0,645
175	53,734	54,048	-0,314	-0,581
200	63,639	64,266	-0,627	-0,976

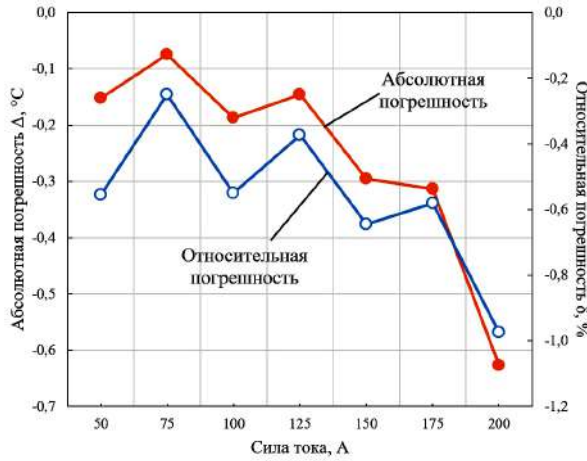


Рис. 3. Сравнительный анализ метода конечных элементов и представленной математической модели при изменении силы тока  
 Fig. 3. Comparative analysis of the finite element method and the presented mathematical model at changing the current intensity

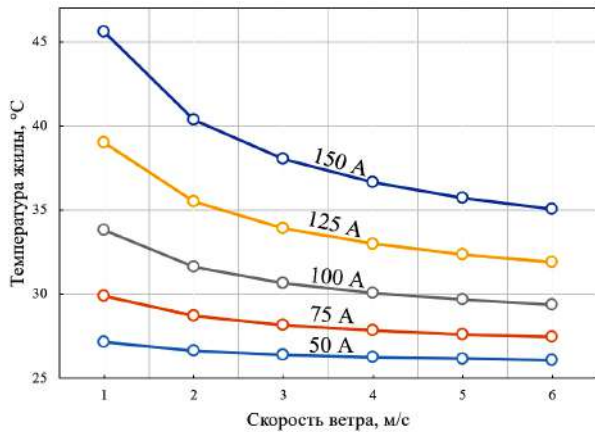


Рис. 4. Зависимость температуры жилы провода от скорости ветра при силе тока 50, 75, 100, 125, 150 А  
 Fig. 4. Wire core temperature dependence on wind speed at current strengths of 50, 75, 100, 125, 150 А

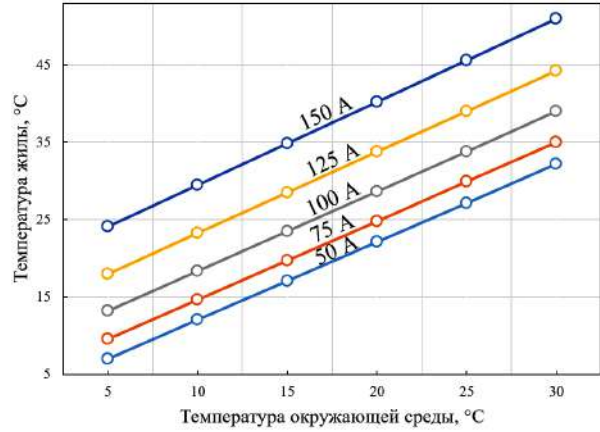


Рис. 5. Зависимость температуры жилы провода от температуры окружающей среды при силе тока 50, 75, 100, 125, 150 А  
 Fig. 5. Wire core temperature dependence on surrounding temperature at current strengths of 50, 75, 100, 125, 150 А

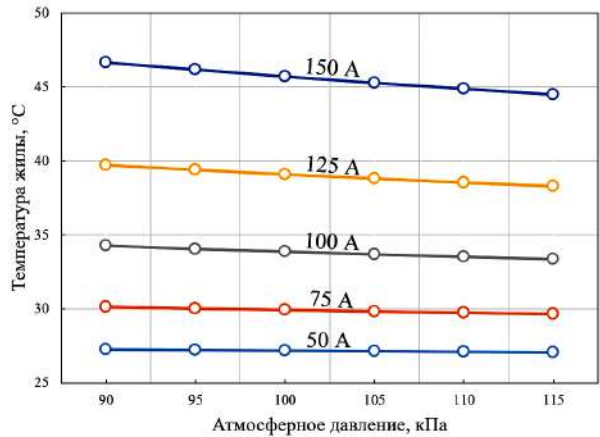


Рис. 6. Зависимость температуры жилы провода от атмосферного давления при силе тока 50, 75, 100, 125, 150 А  
 Fig. 6. Wire core temperature dependence on atmospheric pressure at current strength of 50, 75, 100, 125, 150 А

ставлены на рис. 1 и рис. 2. В табл. 2 отображен сравнительный анализ представленной математической модели с методом конечных элементов. На рис. 3 изображена абсолютная и относительная погрешность между представленной математической моделью и методом конечных элементов. Можно наблюдать высокую степень соответствия с представленной математической моделью. Погрешность расчета можно минимизировать, увеличивая плотность ячеек сетки.

Компьютерное моделирование, в отличие от существующих математических моделей, позволяет отобразить градиент температуры внутри проводника.

Однако ввиду высокой теплопроводности металлов и небольших диаметров проводников данная величина имеет небольшие отклонения.

Хотя компьютерное моделирование предлагает множество очевидных преимуществ, важно отметить, что в сфере практики проектирования численные методы, как правило, являются основными используемыми инструментами.

Представленный метод дополнительно сравнивался с методами IEEE 738 и SIGRE 601 для случая

неизолированных проводов; погрешность между полученными значениями была минимальна.

### Влияние метеофакторов

Рассмотрим детальнее влияние метеофакторов по отдельности.

Наличие ветра способствует охлаждению проводника, что приводит к снижению его температуры за счет вынужденной конвекции, причем этот эффект становится все более выраженным по мере увеличения скорости воздушного потока. На рис. 4 представлено влияние скорости ветра на температуру жилы проводника при различных значениях силы тока. В то же время учет скорости ветра вдоль всей линии представляется сложной задачей из-за сложной траектории движения воздушных масс [14].

Температура окружающей среды также оказывает значительное влияние на тепловое состояние проводников. По мере повышения температуры воздуха проводник способен рассеивать меньше тепла посредством конвекции и излучения, что приводит к повышению его температуры [15]. На рис. 5 отображено влияние температуры окружающей

среды на температуру жилы проводника при вариации силы тока. На рисунке можно увидеть, что изменение температуры имеет линейный характер, что делает этот фактор более точным для расчетов в отличие от влияния ветра.

Атмосферное давление оказывает менее выраженное влияние на тепловое состояние проводников по сравнению с температурой окружающей среды и ветром. Уменьшение атмосферного давления приводит к снижению эффективности теплообмена, что, в свою очередь, повышает температуру проводника. На рис. 6 отображена связь между температурой окружающей среды и температурой жилы проводника при некоторых значениях силы тока.

### Заключение

Исследование, представленное в этой статье, подчеркивает растущую важность учета погодных факторов при эксплуатации воздушных линий электропередачи, особенно в условиях растущего потребления электроэнергии и устаревания инфраструктуры электросетевого комплекса. Поскольку тепловые нагрузки на линии электропередачи достигают предельных значений, способность точно оценивать тепловые состояния проводов становится необходимой для обеспечения надежности и в то же время повышения эффективности энергосистемы.

Математическая модель, полученная в этом исследовании, предлагает упрощенный, но эффективный подход к расчету температуры как изолированных, так и неизолированных проводников в различных условиях окружающей среды. Проведенный анализ подтверждает, что представленная модель не только обладает высоким уровнем точности, но и практична для внедрения в инженерные процессы.

Следует учитывать, что компьютерное моделирование, математические модели и даже датчики измерения температуры обладают определенным уровнем погрешности. Эта присущая неопределенность должна быть тщательно рассмотрена и учтена определенным запасом прочности в любом практическом применении.

### Список источников / References

1. World Energy Investment 2024. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024> (accessed: 16.09.2024).
2. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (accessed: 16.09.2024).
3. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2024 г. № 4153-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 2025. № 2, ст. 75. С. 634–725.
4. General'naya skhema razmeshcheniya ob'yektov elektroenergetiki do 2042 goda: utv. rasporyazheniyem Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 30 dekabrya 2024 g. № 4153-r [The general layout of electric power facilities until 2042: approved by the decree of the Government of the Russian Federation. No. 4153-r of the Russian Federation dated December 30, 2024] // Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii [Collection of legislation of the Russian Federation]. 2025. No. 2, art. 75. P. 634–725. (In Russ.).
5. Средний показатель износа электросетевой инфраструктуры «Россети» может превысить 60 % к 2025 году // Энергетика и промышленность России. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2021/2875181.htm> (дата обращения: 16.09.2024).
6. Sredniy pokazatel' iznosa elektrossetevoy infrastruktury «Rosseti» mozhnet prevysit' 60 % k 2025 godu [The average depreciation rate of ROSSETI's power grid infrastructure may exceed 60 % at 2025]. Energetika i Promyshlennost' Rossii. *Energy and Industry in Russia*. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2021/2875181.htm> (accessed: 16.09.2024). (In Russ.).
7. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 9.06.2020 г. № 1523-р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Ob utverzhenii Energeticheskoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r [On approval of the energy strategy of the Russian Federation until 2035: Decree of the Government of the Russian Federation of 9 June 2020 No. 1523-r]. Available at ConsultantPlus. (In Russ.).
9. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE. 2013. P. 1–72. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858.
10. Guide for thermal rating calculations of overhead lines. *CIGRE*. 2014. 95 p.
11. СТО 56947007-29.240.55.143–2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Введ. 2013–02–13. Москва: ОАО «ФСК ЕЭС», 2013. 42 с.
12. STO 56947007-29.240.55.143–2013. Metodika rascheta predel'nykh tokovykh nagruzok po usloviyam sokhraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimyykh gabaritov vozdushnykh liniy: Standart organizatsii ОАО «FSK EES» [STO 56947007-29.240.55.143–2013. Calculation methodology for current limit loads on conditions of mechanical strength of wires and permissible dimensions of overhead lines: Standard of the organization JSC «Federal Grid Company of Unified Energy System»]. Moscow, 2013. 42 p. (In Russ.).
13. Martinez R., Manana M., Arroyo A. [et al.]. Dynamic rating management of overhead transmission lines operating under multiple weather conditions. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 4. DOI: 10.3390/en14041136.
14. ГОСТ 31946–2012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия. Введ. 12–03–2012. Москва: Стандартинформ, 2013. 20 с.
15. GOST 31946–2012. Provoda samonesushchiye izolirovannyye i zashchishchennyye dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi. Obshchiye tekhnicheskkiye usloviya [Insulated and protected wires for overhead power lines. General specifications]. Moscow, 2012. 20 p. (In Russ.).
16. Петрова Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 134–145. EDN: LDQZUC.
17. Petrova E. V. Otsenka vliyaniya solnechnoy radiatsii na nagruzochnyye poteri aktivnoy moshchnosti v vysokotemperaturnyykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh liniy elektroperedachi [Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines]. *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 3 (39). P. 134–145. EDN: LDQZUC. (In Russ.).
18. Курош А. Г. Курс высшей алгебры: Москва: Наука, 1968. 431 с.
19. Kurosh A. G. Kurs vysshey algebry [Higher mathematics course]. Moscow, 1968. 431 p. (In Russ.).

14. Liu Z., Deng H., Peng R. [et al.]. An equivalent heat transfer model instead of wind speed measuring for dynamic thermal rating of transmission lines. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 18. DOI: 10.3390/en13184679.

15. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Криволапов В. А., Горюнов В. Н., Троценко В. М. Анализ длительно допустимых токов и потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических факторов // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB.

Petrova E. V., Girshin S. S., Krivolapov V. A., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. Analiz dlitel'no dopustimyykh tokov i poter' aktivnoy moshchnosti v vozdushnykh liniyakh elektropredachi s uchetom klimaticheskikh faktorov [The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB. (In Russ.).

**КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

Адрес для переписки: KrivolapovVladislav1998@gmail.com

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

**ДЕЕВ Владислав Александрович**, магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: vlad\_deev@inbox.ru

**ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

**ГОРЮНОВ Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

**НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1649-8920

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

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

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 20.04.2025; принята к публикации 06.05.2025.

**KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich**, Postgraduate of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

Correspondence address: KrivolapovVladislav1998@gmail.com

**GIRSHIN Stanislav Sergeyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

**PETROVA Elena Vladimirovna**, Senior Lecturer of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

**DEEV Vladislav Aleksandrovich**, Master's Student of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: vlad\_deev@inbox.ru

**TROTSENKO Vladislav Mikhaylovich**, Senior Lecturer of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3958-5882

AuthorID (RSCI): 889516

**GORYUNOV Vladimir Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

**NIKOLAEV Mikhail Yuryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1649-8920

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

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

The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 20.04.2025; accepted for publication 06.05.2025.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Е. А. Темников, К. И. Никитин

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье рассматривается применение искусственных нейронных сетей для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения. В условиях насыщения данные трансформаторы могут искажать сигналы, что приводит к некорректной работе измерительных и защитных устройств. Использование искусственных нейронных сетей позволяет повысить точность обработки сигналов, улучшить надежность и безопасность электроэнергетических систем. В работе описываются методы обучения нейронных сетей на основе исторических данных, моделирование работы трансформаторов при различных условиях и алгоритмы коррекции искажений, вызванных насыщением.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети, насыщение трансформаторов, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, коррекция сигналов, электроэнергетические системы, обработка сигналов.

**Для цитирования:** Темников Е. А., Никитин К. И. Применение искусственных нейронных сетей для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 89–95. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-89-95. EDN: KIYQTY.



© Темников Е. А., Никитин К. И., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR SATURATION CORRECTION IN CURRENT AND VOLTAGE TRANSFORMERS

E. A. Temnikov, K. I. Nikitin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article investigates the application of artificial neural networks for saturation correction in current and voltage transformers. Under saturation conditions, these transformers can distort signals, leading to the incorrect operation of measuring and protection devices. The use of artificial neural networks allows increasing accuracy in signal processing, thereby improving the reliability and safety of electric power systems. The paper describes methods for training neural networks using historical data, modeling transformer operation under various conditions, and developing algorithms for correcting distortions caused by saturation.

**Keywords:** artificial neural networks, transformer saturation, current transformers, voltage transformers, signal correction, electric power systems, signal processing.

**For citation:** Temnikov E. A., Nikitin K. I. Application of artificial neural networks for saturation correction in current and voltage transformers. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 89–95. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-89-95. EDN: KIYQTY.



© Temnikov E. A., Nikitin K. I., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Введение

Трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) играют ключевую роль в измерительных и защитных устройствах электроэнергетических систем.

Они позволяют преобразовывать высокие уровни токов и напряжений в измеримые и безопасные для оборудования значения. Однако трансформаторы подвержены явлению насыщения, которое может

приводить к искажению выходных сигналов. Это, в свою очередь, может вызывать некорректную работу релейной защиты, нарушать точность измерений и в итоге снижать надежность и безопасность электроэнергетических систем [1, 2].

Традиционные методы борьбы с насыщением трансформаторов включают использование специальных конструкций трансформаторов, а также применение фильтров и других средств коррекции. Однако они не всегда обеспечивают достаточную точность и требуют значительных затрат [3–5]. В связи с этим растет интерес к применению современных методов обработки данных, таких как искусственные нейронные сети (ИНС), для решения данной проблемы.

Искусственные нейронные сети представляют собой мощный инструмент машинного обучения, способный выявлять сложные зависимости в данных и осуществлять нелинейную коррекцию сигналов. В данной статье рассматриваются методы применения ИНС для коррекции искажений, вызванных насыщением трансформаторов тока и напряжения. Приводятся результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенных методов, а также обсуждаются перспективы их практического применения.

### Цель исследования

Основной задачей данной работы является разработка методов коррекции искажений, вызванных насыщением трансформаторов тока и напряжения, с использованием ИНС.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие подзадачи:

1. Анализ природы насыщения трансформаторов: Изучение причин и условий возникновения насыщения, а также его влияния на точность выходных сигналов трансформаторов. Выявление основных параметров, которые необходимо учитывать при коррекции сигналов.

2. Моделирование процесса насыщения: создание модели, которая точно описывает поведение трансформаторов в условиях насыщения. Эта модель будет использоваться для генерации данных, необходимых для обучения и тестирования ИНС.

3. Разработка архитектуры ИНС: Определение оптимальной структуры нейронной сети, включая количество слоев, количество нейронов в каждом слое, типы активационных функций и методы обучения.

4. Обучение и тестирование ИНС: использование исторических данных и данных, полученных из модели насыщения, для обучения нейронной сети. Тестирование сети на различных наборах данных для оценки её эффективности в коррекции сигналов.

5. Оценка эффективности методов: сравнение предложенного подхода с традиционными методами коррекции. Оценка точности, надежности и скорости работы разработанной системы.

6. Разработка рекомендаций по практическому применению: определение областей применения разработанных методов и рекомендаций по их интеграции в существующие электроэнергетические системы.

Целью работы является создание эффективного инструмента, способного улучшить точность и надежность работы измерительных и защитных устройств, использующих трансформаторы тока и напряжения.

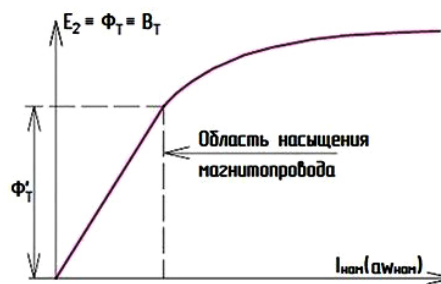


Рис. 1. Характеристика намагничивания трансформатора тока  
 Fig. 1. Magnetization characteristic of a current transformer

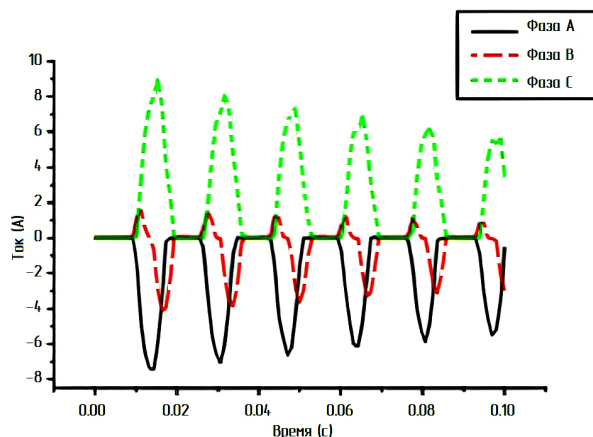


Рис. 2. Пусковой ток идеального ТТ  
 Fig. 2. Inrush current of an ideal CT

### Основная часть

Трансформаторы тока и напряжения широко используются в электроэнергетических системах для обеспечения безопасного измерения электрических параметров и работы защитных устройств. Однако при высоких уровнях тока или напряжения, а также при появлении гармонических искажений трансформаторы могут достигать состояния насыщения. В таких условиях магнитный сердечник перестает эффективно преобразовывать сигнал, что приводит к его искажению. Эти искажения могут проявляться в следующих формах:

- ослабление амплитуды сигнала;
- появление высших гармоник;
- фазовые сдвиги.

Для уменьшения погрешностей трансформатор тока должен работать в прямолинейной части своей характеристики намагничивания (рис. 1), где ток намагничивания пропорционален потоку в сердечнике трансформатора.

Насыщение трансформаторов тока и напряжения происходит, когда магнитный сердечник трансформатора достигает своей магнитной индукции насыщения и дальнейшее увеличение тока или напряжения не приводит к пропорциональному увеличению магнитного потока. Это приводит к искажению выходных сигналов трансформатора. Насыщение может возникать из-за различных факторов, включая высокие уровни токов и напряжений, наличие гармонических составляющих в сети, а также конструктивные особенности трансформаторов. Чтобы проиллюстрировать эту ситуацию, на рис. 2 показан случай: пусковой ток, в котором насыщение отсут-

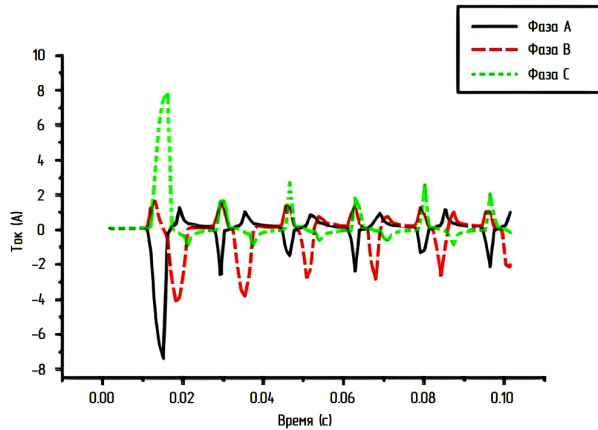


Рис. 3. Пусковой ток ТТ с насыщением  
Fig. 3. Inrush current of CT with saturation

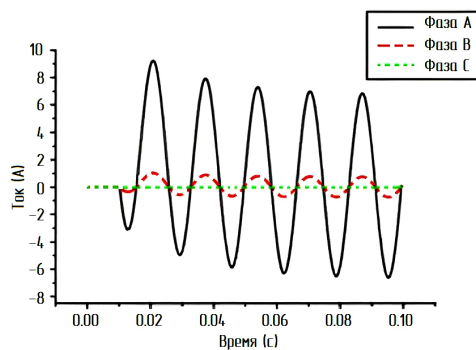


Рис. 4. Ток идеального ТТ при внутреннем повреждении силового трансформатора  
Fig. 4. Ideal CT current at internal fault of a power transformer

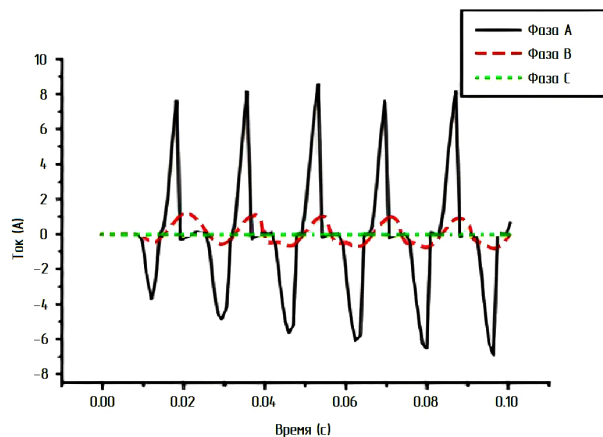


Рис. 5. Ток ТТ с насыщением при внутреннем повреждении силового трансформатора  
Fig. 5. CT current with saturation at internal fault of a power transformer

ствует, поскольку рассматривается идеальный ТТ. На рис. 3 показан тот же случай, где отчетливо видны искажения, вызванные насыщением.

Можно заметить разницу в формах сигналов для одной и той же ситуации, но с разными трансформаторами тока. На рис. 4 и рис. 5 показан случай внутреннего повреждения силового трансформатора с идеальным ТТ, а также с наличием явления насыщения ТТ соответственно.

Искажения, вызванные насыщением, могут приводить к существенным ошибкам в измерении параметров электроэнергетических систем и некорректной работе защитных устройств. Эти искажения могут проявляться в виде уменьшения амплитуды сигнала, появления высших гармоник и фазовых смещений. Важно корректировать эти искажения для обеспечения надежной работы систем управления и защиты.

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются мощным инструментом, способным решать задачи, связанные с нелинейной обработкой данных. Их применение для коррекции насыщения трансформаторов основано на следующих принципах:

- обучение на основе данных. Когда трансформатор тока входит в режим насыщения, его вторичный ток перестает точно соответствовать первичному — появляются искажения, особенно при коротких замыканиях. В таких случаях корректные (или «истинные») выходные сигналы — это те, которые отражали бы поведение ТТ без насыщения. Для получения этих данных используется моделирование, эксперименты в лаборатории, фильтрация\ оценка истинного тока, дублирование измерений. ИНС обучаются на полученных данных, что позволяет выявлять сложные зависимости между искаженным и истинным сигналом;

- обработка сигналов в реальном времени: После обучения сеть может использоваться для коррекции сигналов в реальном времени, обеспечивая высокую скорость и точность;

- адаптивность: ИНС способны адаптироваться к изменениям входных данных и условий эксплуатации трансформаторов за счет дообучения.

ИНС представляют собой вычислительные модели, моделирующие принципы функционирования биологических нейронных систем. Основные элементы ИНС включают:

- нейроны — основные вычислительные элементы, которые принимают несколько входных сигналов ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) которые поступают от других нейронов или внешних источников. Каждое входное значение умножается на свой вес ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ ), отражающий важность данного входа. После происходит обработка и генерация выходного сигнала.

- слои: нейроны в нейронной сети объединяются в слои, которые выполняют различные функции. Входной слой получает данные, скрытые слои обрабатывают информацию, а выходной слой выдает результат. Каждый нейрон одного слоя связан со всеми нейронами следующего слоя (в случае полносвязных сетей). Однако существуют архитектуры, где связи могут быть ограниченными, например, в сверточных или рекуррентных сетях;

- активационные функции — это ключевой элемент работы нейронной сети, который вводит нелинейность. Без них сеть не смогла бы моделировать сложные зависимости и свелась бы к простой линейной модели. Функции определяют, как обрабатывается сумма взвешенных входов в нейроне ( $z$ ) и как этот результат передается на следующий слой. Популярные функции включают сигмоидную (Sigmoid), ReLU (Rectified Linear Unit) и тангенс гиперболический (Tanh). Нелинейные активационные функции позволяют сети обучаться сложным зависимостям в данных. Без них модель могла бы обучить только линейные функции, которые ограничены в своей выразительности.

Совместная работа всех этих компонентов позволяет нейронной сети обучаться на данных,

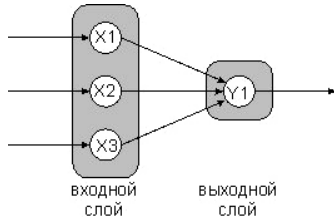


Рис. 6. Простейшая однослойная ИНС  
 Fig. 6. ANN simplest single-layer

обобщать информацию и решать широкий спектр задач.

Простейшая однослойная нейронная сеть показана на рис. 6. Она описывается в общем случае математическим выражением для получения выходной функции  $y_1$  через входные функции  $x_1, x_2, x_3$ :

$$y_1^{(2)} = g(\vartheta_{11}^{(1)}x_1 + \vartheta_{12}^{(1)}x_2 + \vartheta_{13}^{(1)}x_3).$$

Поскольку ИНС могут обеспечить превосходное распознавание образов, они были предложены мно-

гими исследователями для выполнения различных задач в релейных системах электроснабжения для обработки сигналов и принятия решений [6–12].

Для разработки нейронной сети существует множество различных сред и инструментов, которые предоставляют удобные и мощные возможности для создания, обучения и тестирования моделей. Самые популярные из них:

- TensorFlow;
- PyTorch;
- Keras;
- Jupyter Notebook;
- Google Colab;
- Microsoft Azure Machine Learning;
- AWS SageMaker.

Один из методов коррекции насыщения ТТ заключается в применении инверсной передаточной функции ТТ в форме ИНС [13]. Функция коррекции и передаточная функция последовательно включенных ТТ должны обеспечивать идентичность первичного и компенсированного вторичного токов. Это означает, что система коррекции должна полностью компенсировать искажения, возникающие в процессе работы ТТ. Поскольку передаточная функция ТТ является нелинейной, то следует использовать

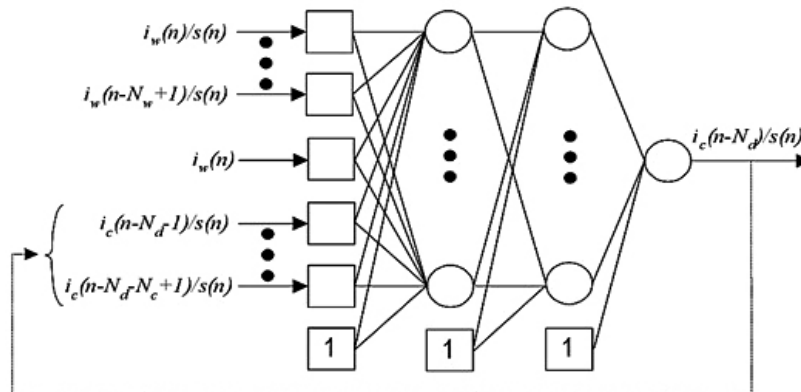


Рис. 7. Структура ИНС для коррекции ТТ  
 Fig. 7. Structure of ANN for CT correction

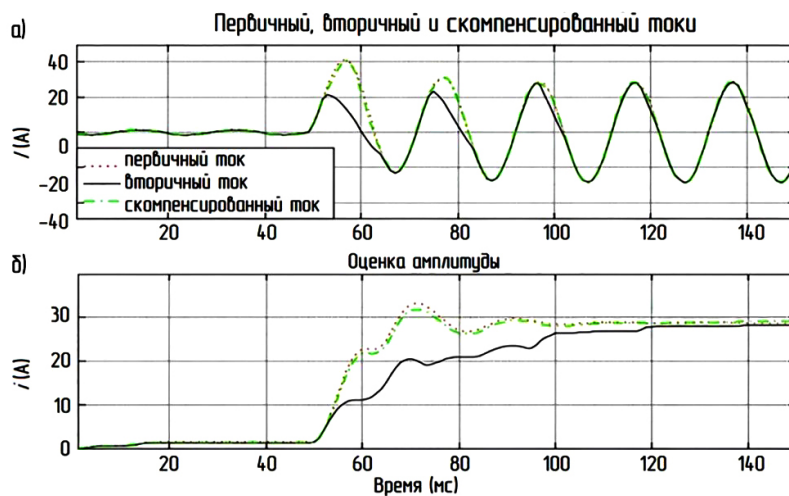


Рис. 8. График токов фазы В, полученных при моделировании 3-фазного замыкания на подстанции ( $R = 0$  Ом). Компенсация, осуществляемая ИНС структуры 5-5-1 (а). Оценка амплитуды первичного, вторичного и скомпенсированного тока (б)  
 Fig. 8. Graph of phase B currents obtained by modeling a 3-phase substation fault ( $R = 0$  Ом). Compensation performed by the ANN of the 5-5-1 structure (a). Estimation of the amplitude of the primary, secondary and compensated current (b)

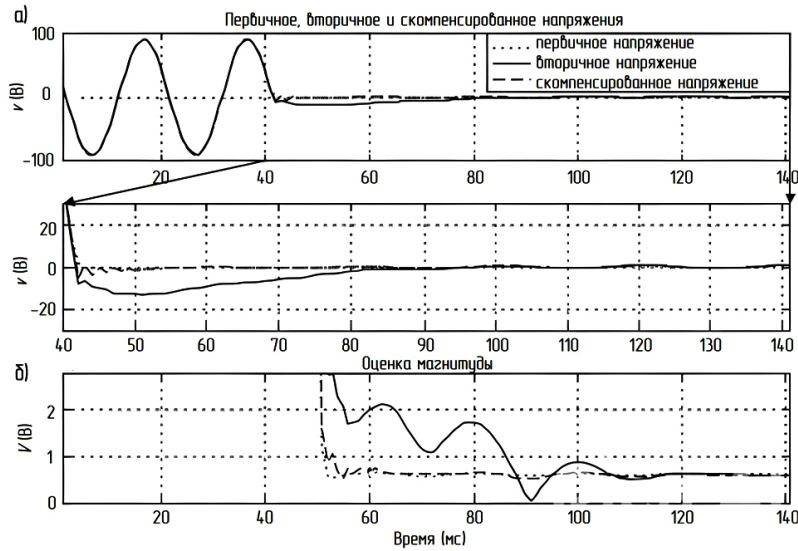


Рис. 9. Результаты компенсации ошибок переходных процессов ТН при замыкании на землю на подстанции. Компенсация, осуществляемая ИНС структуры 5-5-1 (а); оценка амплитуды первичного, вторичного и скомпенсированного напряжения (б)

Fig. 9. Results of the transient errors compensation of VT transients in case of earth fault at substation. Compensation performed by the ANN of the 5-5-1 structure (a); estimation of the amplitude of primary, secondary and compensated voltage (b)

нелинейную искусственную многослойную нейронную сеть с некоторой формой обратной связи (рекуррентная сеть), как показано на рис. 7.

Наличие обратной связи в архитектуре сети позволяет учитывать историю изменения сигнала, что особенно важно для компенсации насыщения, имеющего временную компоненту. Обратная связь помогает сети анализировать динамические характеристики сигнала и более точно восстанавливать его форму.

Сигмоидальная тангенциальная функция активации предназначена для нейронов скрытых слоев, а линейная — для выходного нейрона выбранной архитектуры ИНС.

Расширенное скользящее окно данных, включающее последние и несколько предыдущих выборок сигнала, подаётся на вход искусственной нейронной сети. Масштабированные отсчёты тока трансформатора тока обозначаются как  $i_w(n-N+1), \dots, i_w(n)$  и поступают на вход регистра.

Следует отметить, что все приведённые токи относятся к вторичной обмотке ТТ. Выходной сигнал нейросети  $i_c(n-N_d)$  представляет собой скорректированный вторичный ток, приближённый по форме и значению к идеальному первичному току, приведённому к вторичной стороне.

Результат компенсации вторичного тока ТТ представлен на рис. 8. Форма сигнала вторичного тока была получена из программы ЕМТР, моделирующей трехфазное замыкание на подстанции. Видно, что предложенный ИНС корректор практически идеально воспроизводит первичный ток. Величина тока (рис. 8б) оценивается в соответствии с полно-периодным методом Фурье.

Для лучшего понимания результатов следует указать номинальные токи обмоток трансформатора тока, использованного в моделировании:

номинальный ток первичной обмотки —  $I_{1N} = 600 \text{ A}$ ,

номинальный ток вторичной обмотки —  $I_{2N} = 5 \text{ A}$ .

В общем случае динамика ТН определяется двумя факторами:

- нелинейными колебаниями при насыщении магнитопровода ТН;
- разрядкой внутренней энергии ТН при коротких замыканиях на соответствующей линии электропередачи.

Более сильное влияние оказывает второй источник переходных ошибок. В частности, неисправности при пересечении нуля первичных напряжений приводят к значительным переходным ошибкам, которые, в свою очередь, влияют на работу питающих реле.

Идея компенсации ошибок переходных процессов ТН, представленная в [11], основана на нахождении обратной передаточной функции модели ТН и воспроизведении ее с помощью ИНС. Что аналогично подходу, используемому для коррекции ТТ. Таким образом, предлагаемый ИНС-корректор имеет общую структуру, как на рис. 7.

При коротком замыкании на землю напряжение на трансформаторе тока уменьшается, что исключает вероятность насыщения магнитопровода. В таких условиях программа корректирует форму и амплитуду вторичного тока, компенсируя переходные искажения и восстанавливая точность измерений для дальнейшего использования в системе защиты.

Были протестированы и проанализированы различные варианты размерностей ИНС и соединений вход/обратная связь. В качестве примера на рис. 9 представлен результат коррекции ТН при замыкании фазы на землю на подстанции. Замыкание происходит, когда напряжение первичной обмотки поврежденной фазы пересекает нулевое значение.

### Заключение

Результаты исследования показали, что применение ИНС для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения позволяет значительно улучшить точность обработки сигналов и повысить надёжность работы электроэнергетических систем.

Проведённые эксперименты и моделирование подтвердили эффективность предложенных методов в различных условиях эксплуатации.

ИНС продемонстрировали высокую способность к обучению на исторических данных и моделях насыщения, что позволило эффективно компенсировать искажения сигналов, вызванные насыщением трансформаторов. В ходе тестирования на различных наборах данных было зафиксировано значительное снижение амплитудных и фазовых искажений, что свидетельствует о корректности работы предложенного метода. Сравнение результатов с традиционными методами коррекции показало, что ИНС превосходят их по точности, особенно в условиях сильного насыщения и наличия нелинейных искажений.

Одним из ключевых преимуществ ИНС является их универсальность и адаптивность. Обученные нейронные сети показали способность корректировать искажения не только в условиях, на которых они были обучены, но и в новых, ранее неизвестных ситуациях. Это делает использование ИНС перспективным для различных типов трансформаторов и условий эксплуатации. Кроме того, возможность дообучения сети по мере накопления новых данных позволяет поддерживать высокую точность работы на протяжении всего времени эксплуатации трансформаторов.

Несмотря на высокую точность и адаптивность, одним из вызовов применения ИНС является их вычислительная сложность. Процесс обучения нейронной сети требует значительных ресурсов и времени, особенно при использовании больших наборов данных. Однако после завершения обучения работа сети в реальном времени требует существенно меньших вычислительных мощностей, что позволяет применять её в режиме онлайн для коррекции сигналов в энергосистемах.

Применение ИНС для коррекции насыщения имеет высокую практическую значимость. В реальных условиях работы электроэнергетических систем способность компенсировать искажения сигналов трансформаторов может значительно повысить надёжность и точность работы релейной защиты и систем управления. Это особенно важно в условиях перегрузок и аварийных ситуаций, где даже небольшие ошибки в измерениях могут привести к серьёзным последствиям. Результаты исследования демонстрируют потенциал ИНС как эффективного инструмента для улучшения качества работы трансформаторов тока и напряжения.

Несмотря на положительные результаты, существуют определённые ограничения. Во-первых, качество работы ИНС зависит от объёма и качества данных, использованных для обучения. В некоторых случаях может потребоваться длительный период для сбора достаточного количества данных для обучения сети. Во-вторых, возможна необходимость регулярного дообучения сети для поддержания её точности в условиях изменения параметров системы.

Предложенный метод может быть интегрирован в существующие системы управления электроэнергетикой. Его использование особенно эффективно в высоковольтных сетях, где насыщение трансформаторов наиболее выражено. Внедрение данного подхода позволит повысить надёжность работы измерительных и защитных устройств, что минимизирует риски возникновения аварийных ситуаций.

Также для компенсации токов, возникающих при насыщении трансформаторов тока и напряжения, можно использовать электронные схемы с обратной связью. Эти схемы обладают рядом преимуществ, таких как меньшая вычислительная сложность и простота реализации в реальном времени, что делает их привлекательными для оперативной компенсации искажений без необходимости использования сложных методов машинного обучения.

Однако использование электронных схем с обратной связью ограничено их меньшей адаптивностью и способностью компенсировать нелинейные искажения. Такие схемы могут быть эффективно использованы в фиксированных условиях, но для сложных или меняющихся режимов работы энергетических систем ИНС, благодаря своей адаптивности и способности обучаться на данных, могут оказаться более универсальным решением.

Для дальнейшего улучшения метода коррекции насыщения рекомендуется провести дополнительные исследования по оптимизации архитектуры нейронной сети, разработке методов ускорения процесса обучения, а также интеграции ИНС в существующие системы управления электроэнергетическими системами.

#### Список источников / References

1. Александров А. В. Влияние быстрого насыщения трансформаторов тока на работу РЗ // Молодой ученый. 2021. № 16 (358). С. 73–74. EDN: CZEEYC.
1. Aleksandrov A. V. Vliyaniye bystrogo насыshcheniya transformatorov toka na rabotu RZ [The effect of rapid saturation of current transformers on the operation of RZ]. *Molodoy uchenyy. Young Scientist*. 2021. No. 16 (358). P. 73–74. EDN: CZEEYC. (In Russ.).
2. Романюк Ф. А., Тишечкин А. А., Румянцев В. Ю. [и др.]. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу токовых защит // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. № 1. С. 5–10. EDN: RHWZCR.
2. Romanyuk F. A., Tishechkin A. A., Rumyantsev V. Yu. [et al.]. Vliyaniye насыshcheniya transformatorov toka na rabotu tokovykh zashchit [Influence of current transformer saturation on operation of current protection]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2010. No. 1. P. 5–10. EDN: RHWZCR. (In Russ.).
3. Баглейбтер О. И. О выборе трансформаторов тока для РЗА в зависимости от постоянной времени первичной сети // Автоматизация промышленности. 2008. № 8. С. 67–68. EDN: JRYMWH.
3. Bagleybter O. I. O vybore transformatorov toka dlya RZA v zavisimosti ot postoyannoy vremeni pervichnoy seti [On the selection of current transformers for RPA depending on the time constant of the primary network]. *Avtomatizatsiya promyshlennosti. Industrial Automation*. 2008. No. 8. P. 67–68. EDN: JRYMWH. (In Russ.).
4. Ozgonenel O. Correction of saturated current from measurement current transformer. *IET Electric Power Applications*. 2013. No. 7 (7). P. 580–585. DOI: 10.1049/iet-epa.2013.0105.
5. Одинаев И. Н., Мурзин П. В., Паздерин А. В. [и др.]. Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18. EDN: FPFIOC.
5. Odinayev I. N., Murzin P. V., Pazderin A. V. [et al.]. Analiz matematicheskikh metodov snizheniya pogreshnosti

transformatora toka v rezhime nasyshcheniya [Analysis of mathematical methods for decreasing the saturated current transformer error]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2020. No. 2 (47). P. 11–18. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18. EDN: FPFIOC. (In Russ.).

6. Sanjay M., Raseswari P. Fault Classification for High Impedance Faults Using Back Propagation Based Artificial Neural Network Technique. *2024 International Conference on Sustainable Power & Energy (ICSPE)*. 2024. DOI: 10.1109/61.400828.

7. Radhi A. Classification and direction discrimination of faults in transmission lines using 1D convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 12, no. 12 (3). P. 1928–1939. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i3.pp1928-1939.

8. Wujie Z., Chuanming J., Meixin F. Transmission Line Detection Through Bi-Directional Guided Registration With Knowledge Distillation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. Vol. 20. P. 5671–5682.

9. Md. Rafayel B., Sabbir A., Nur Mohammad M., Kazi M., Asfaqr R., Abdullah A. ANN Based Fault Detection & Classification in Power System Transmission line. *2021 International Conference on Science & Contemporary Technologies (ICSCT)*. 2021. DOI:10.1109/ICSCT53883.2021.9642410.

10. Fraga A., Silveira E. G., Alipio R. Artificial Neural Network Applied to Differential Protection of Power Transformers. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. 2021. № 33 (3). DOI: 10.1007/s40313-021-00845-3.

11. Aswin K. S., Manav P., Polisetty S., Angel T. S. ANN and Deep Learning Classifiers for BCI applications. *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*. 2022. DOI: 10.1109/ICICICT54557.2022.9917834.

12. Lukowicz M., Rosolowski E. Fault type classification in high voltage power systems using artificial neural networks. URL: <https://www.researchgate.net/publication/265944524> (accessed: 22.02.2025).

13. Lukowicz M., Rosolowski E. Artificial neural network based dynamic compensation of current transformer errors. *Proceedings of the 8th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*. Brussels, 8–10 October. 1998. P. 19–24.

**ТЕМНИКОВ Евгений Александрович**, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6951-3997

AuthorID (РИНЦ): 1215049

ORCID: 0000-0001-9901-0687

Адрес для переписки: evgentemnik@yandex.ru

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: n-c-i@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принята к публикации 07.05.2025.

**ТЕМНИКОВ Evgeny Aleksandrovich**, Postgraduate of the Theoretical and General Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 6951-3997

AuthorID (RSCI): 1215049

ORCID: 0000-0001-9901-0687

Correspondence address: evgentemnik@yandex.ru

**NIKITIN Konstantin Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Theoretical and General Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3733-8763

AuthorID (RSCI): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Correspondence address: n-c-i@mail.ru

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

The article was submitted 12.12.2024; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 07.05.2025.

УДК/UDC 621.37

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-96-106

EDN: JOAKSK

Научная статья / Original article

## ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПОЛЮСНОГО ФИЛЬТРА

М. Н. Максимов<sup>1</sup>, С. М. Максимова<sup>2</sup><sup>1</sup>Южный федеральный университет, г. Таганрог<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,  
г. Ростов-на-Дону

В статье предложен интерфейс (многополюсный фильтр), обеспечивающий устойчивость процесса полунатурного моделирования исходной системы в случае, когда фрагменты системы представлены N-полюсниками, связанными друг с другом сильной обратной связью (HIL).

Так, в частности, в статье в качестве исходной системы рассматривается обобщенная радиотехническая система, фрагменты которой являются N-полюсниками, которые обмениваются друг с другом на каждом шаге моделирования токами и напряжениями через предложенный интерфейс (2xN-полюсник/фильтр). Анализ устойчивости процесса HIL-моделирования ведется методами теории цепей и численными методами решения систем линейных алгебраических уравнений. Показан способ определения стабилизирующих параметров фильтра. Указано, что при этих параметрах фильтр является идеальной линией задержки, т.е. амплитудно-частотная характеристика фильтра не зависит от частоты, а фазо-частотная характеристика изменяется прямо пропорционально частоте, причем коэффициент пропорциональности — время задержки.

Адекватность полученных теоретических результатов иллюстрируется с помощью численного моделирования по частям трехфазного инвертора.

Более того, в статье сделано предложение, поскольку фильтр при правильном выборе параметров имеет уникальные характеристики — является не только идеальной линией задержки, но и фильтром чистой задержки (его амплитудно-частотная характеристика постоянна и равна единице), то его можно было бы назвать multipole pure delay фильтр (mppd-фильтр).

**Ключевые слова:** моделирование в реальном времени, полунатурное HIL-моделирование, устойчивость HIL-моделирования, дополнение Шура, метод решения систем линейных алгебраических уравнений, многополюсный фильтр чистой задержки (mppd-фильтр).

**Для цитирования:** Максимов М. Н., Максимова С. М. Полунатурное моделирование систем с использованием многополюсного фильтра // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 96–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-96-106. EDN: JOAKSK.



© Максимов М. Н., Максимова С. М., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## HIL MODELING OF SYSTEMS USING THE MULTIPOLE FILTER

M. N. Maksimov<sup>1</sup>, S. M. Maksimova<sup>2</sup><sup>1</sup>Southern Federal University, Taganrog, Russia<sup>2</sup>Federal Research Centre Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Rostov-on-Don, Russia

The article proposes an interface (multipole filter) that provides stability of the semi-natural modelling of the initial systems when the fragments of the system are represented by N-poles connected with each other by high intensity loopback (HIL).

Thus, the article considers a generalized radio-technical system as an initial system, which fragments are N-poles that exchange currents and voltages with each other at every simulation through the proposed interface (2xN-pole/filter). The stability analysis of the HIL modeling process is carried out by circuit theory

methods and numerical methods of systems of linear algebraic equations solution. The method of the stabilizing filter parameters determination is demonstrated. At these parameters the filter is an ideal delay line, i.e. the amplitude-frequency response of the filter does not depend on frequency, and the phase-frequency response changes directly proportional to frequency with the proportionality coefficient as the delay time.

The adequacy of the obtained theoretical results is illustrated by means of numerical modeling on three-phase inverter parts.

Moreover, the article assumes that since the filter, with the correct choice of parameters has unique characteristics, it is not only an ideal delay line, but also a pure delay filter, as its amplitude-frequency response is constant and equal to one, it would be called a multipole pure delay filter (mppd-filter).

**Keywords:** real time digital modeling, HIL modeling, stability of the HIL modeling, Schur complement, method of SLAE solution, multipole pure delay filter (mppd-filter).

**For citation:** Maksimov M. N., Maksimova S. M. HIL modeling of systems using the multipole filter. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 96–106. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-96-106. EDN: JOAKSK.



© Maksimov M. N., Maksimova S. M., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

### Введение

В статье предложен интерфейс, обеспечивающий устойчивость процесса полунатурного моделирования исходной системы в случае, когда фрагменты системы представлены N-полюсниками, связанными друг с другом сильной обратной связью.

Полунатурное моделирование — это когда исходная система разбивается на две (или более) части. При этом одна часть системы моделируется численно на компьютере, а другая часть — это реальный физический объект. Части системы обмениваются друг с другом данными в реальном масштабе времени. Обмен данными происходит через программно-аппаратный интерфейс, обеспечивающий цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) сигналов и при необходимости их усиление. Из-за появления в системе программно-аппаратного интерфейса реакция одной части системы на изменения в другой будет происходить с некоторой задержкой  $\tau$ .

Если при полунатурном моделировании между частями системы имеется сильная обратная связь, то такой вид полунатурного моделирования в зарубежной литературе получил название *hardware-in-the-loop simulation* (моделирование с оборудованием в цепи обратной связи), или *HIL-моделирование*. Это обусловлено тем, что наличие задержки  $\tau$  при обмене данными между сильно связанными частями системы приводит к возникновению неустойчивости процесса *HIL-моделирования*, что, в свою очередь, требует принятия дополнительных мер при реализации программно-аппаратного интерфейса.

История развития цифровых симуляторов реального времени (*real time digital simulator — RTDS*) приведена в диссертационной работе [1]. В ней также проведён детальный анализ различных интерфейсных алгоритмов (*interface algorithms — IA*), которые обеспечивают устойчивость процесса *HIL-моделирования*. Из российских публикаций в области устойчивости *HIL-моделирования* или смежных тем стоит выделить работы [2–5].

*HIL-моделирование* широко используется в промышленности, например, для проектирования, тестирования и верификации силовой электроники, микросетей, электромобилей, а также их систем управления и защиты. Поэтому решение задач, направленных на расширение области применения *HIL*, является актуальным.

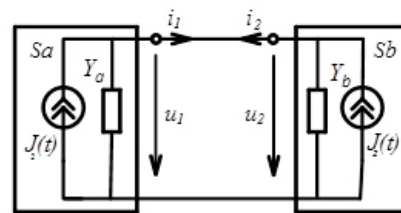


Рис. 1. Исходная система [4]  
Fig. 1. Initial system [4]

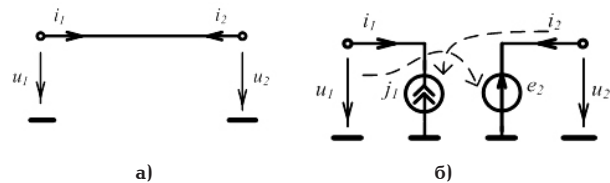


Рис. 2. Замена гальванической связи (а) двумя управляемыми источниками (б) [4]  
Fig. 2. Substitution of galvanic coupling (a) by two controlled sources (b) [4]

### 1. Постановка задачи

Пусть исходная система делится на два фрагмента *Sa* и *Sb* (рис. 1). Поведение этих фрагментов описывается с помощью систем обыкновенных дифференциально-алгебраических уравнений. Соответственно, на схеме  $Y_a$  и  $Y_b$  это выходная и входная проводимости частей *Sa* и *Sb*, а  $J_1(t)$  и  $J_2(t)$  обозначают независимые источники тока.

Гальваническая связь между фрагментами системы, представленная на рис. 2а, может быть заменена эквивалентными ей двумя управляющими связями, изображёнными на рис. 2б.

Поскольку напряжение источника  $e_2$  выбираем равным  $u_1$ , а значение тока источника  $j_1$  выбираем равным  $i_2$ , то уравнения электрического равновесия систем, изображённых на рис. 2а и 2б, будут эквивалентными. Эквивалентность цепей будет сохраняться, если источники напряжения и тока являются безынерционными.

Если же взаимодействие осуществляется с задержкой на величину  $\tau$ , то на устойчивость системы начинает влиять способ разбиения её на части и способ обмена данными между частями системы [4].

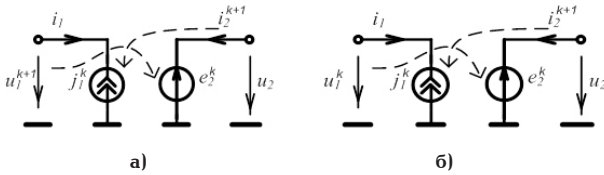


Рис. 3. Два варианта построения элементарных интерфейсных алгоритмов:

а) параллельный обмен данными;

б) последовательный обмен данными [4]

Fig. 3. Two variants of the elementary interface algorithms construction:

a) parallel data exchange;

b) serial data exchange [4]

На рис. 3 показаны четырёхполюсники с двумя существенно разными способами обмена данными между частями системы. В частности, на рис. 3а части системы функционируют параллельно друг другу и в идеале одновременно обмениваются данными на каждом  $k$ -м шаге моделирования (индексом  $k$  обозначен  $k$ -й момент времени) с частотой  $f = 1/T$ , где  $T = \tau = \tau_1 + \tau_2$ ;  $\tau_1, \tau_2$  — интервалы времени, которое требуется для расчёта первой части системы на компьютере и передачи данных между частями системы через программно-аппаратный интерфейс соответственно. Таким образом, в реальной системе при необходимости увеличить  $T$  интервал  $\tau$  нужно искусственно *увеличивать* так, чтобы именно в текущий момент времени  $k+1$ , были измерены значения на входе второй части для передачи их в первую часть и в этот же момент заданы новые значения управляемых источников. После этого части продолжают параллельно функционировать до следующего обмена данными.

На рис. 3б показан последовательный способ обмена данными, т.е. предполагается, что вторая часть ждёт отклика первой части на своё воздействие в течение  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ . Поскольку вторая часть — это реальный физический объект, в котором нельзя приостановить протекание физических процессов на величину  $\tau$ , то в реальных системах, чтобы приблизиться к идеалу, обычно стремятся сделать  $\tau$  как можно меньше и выбрать  $T \gg \tau$ . Задержка  $\tau$  существенно влияет на устойчивость процесса НЛ-моделирования и затрудняет поиск значений стабилизирующих параметров в интерфейсных алгоритмах, основанных на последовательном обмене данными.

Например, если в программно-аппаратном интерфейсе используются усилители, то величина  $\tau_2 \gg \tau_1$  становится значимой, следовательно, и проблем с устойчивостью и сходимостью процесса моделирования тоже становится больше [6–10]. Для акцентирования внимания на этом процессе в литературе для такого вида полунатурного моделирования введён термин РНЛ (power hard ware in the loop).

Если разбиение системы произошло так, что между частями системы нет сильной обратной связи, например при  $Y_a \gg Y_b$ , то данных четырёхполюсников (рис. 3) достаточно, чтобы обеспечить устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования, но если  $Y_a \approx Y_b$ , то — нет. К сожалению, большинство задач в области полунатурного моделирования, связанных с тестированием, отработкой алгоритмов управления, моделированием работы реальных устройств, подразумевает наличие сильной обратной связи между частями системы.

Кроме того, исходная система может быть разбита на части так, что её фрагменты могут быть  $N$ -полюсниками. В этом случае при НЛ-моделировании обмен данными между ними должен обеспечивать  $2xN$ -полюсник, который учитывает, что между фрагментами системы может быть глубокая обратная связь. В литературных источниках, посвящённых НЛ-моделированию, в качестве интерфейса между фрагментами системы обычно рассматривается либо четырёхполюсник, либо  $2xN$ -полюсник [1, 10], представленный набором отдельно взятых четырёхполюсников, которые не учитывают в полной мере наличие глубокой обратной связи между  $N$ -полюсными фрагментами системы.

Таким образом, основная цель данной работы заключается в нахождении такого *многополюсника* ( $2xN$ -полюсника), который обеспечивал бы безусловную устойчивость и сходимость процесса НЛ-моделирования разбитой на части системы в общем случае, т.е. даже при наличии сильной обратной связи между фрагментами системы.

В данной работе под обменом данными понимается итерация значениями токов и напряжений между фрагментами системы, выполняемая на каждом временном шаге с частотой  $f = 1/\tau$ , причём обмен данными будет происходить параллельно, как показано на рис. 3а.

Кроме того, зададим  $h = \tau$ , где  $h$  — шаг интегрирования, используемый при численном решении системы обыкновенных дифференциально-алгебраических уравнений, описывающих часть  $Sa$ ;  $Sa$  — часть системы, которая численно моделируется на компьютере;  $\tau$  — интервал времени, в течение которого часть  $Sa$  рассчитала новые значения и подготовила программно-аппаратный интерфейс к тому, чтобы по окончании интервала выдать новые значения в часть  $Sb$ ;  $Sb$  — часть системы, представленная реальным физическим объектом.

Сравнивая рассматриваемый многополюсник с интерфейсными алгоритмами (четырёхполюсниками) ИТМ (ideal transformer model), ТЛМ (transmission line model), ТФА (time-variant first-order approximation), РСД (partial circuit duplication) и ДИМ (damping impedance method), описанными в [1], из всех ИА только ТЛМ алгоритм, как и многополюсник, обеспечивает параллельный обмен данными, но в ТЛМ алгоритме предполагается, что части системы связаны между собой через реактивный элемент, что сразу сужает область его применения [4].

## 2. Решение поставленной задачи

Для связности изложения материала приведём наиболее значимые результаты, изложенные ранее в [12].

Прежде чем рассматривать многополюсник, рассмотрим его более упрощённый вариант — четырёхполюсник. На рис. 4 и 5 изображён четырёхполюсник в его  $Z$  и  $Y$ -форме. Свойства четырёхполюсника/фильтра подробно описаны в [4, 5, 11, 12].

$Z$  и  $Y$ -параметры четырёхполюсника в операционной форме для соответствующих представлений приведены ниже:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 + z_2 e^{-2p\tau} & (z_1 + z_2) e^{-p\tau} \\ 1 - e^{-2p\tau} & 1 - e^{-2p\tau} \\ (z_1 + z_2) e^{-p\tau} & z_2 + z_1 e^{-2p\tau} \\ 1 - e^{-2p\tau} & 1 - e^{-2p\tau} \end{bmatrix},$$

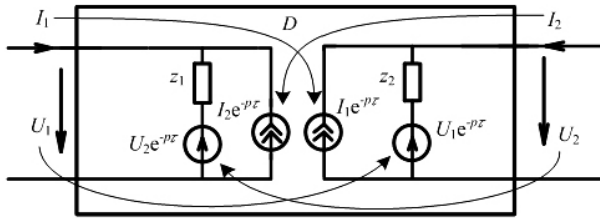


Рис. 4. Z-форма четырёхполюсника [12]  
Fig. 4. Z-shape of the quadripolar [12]

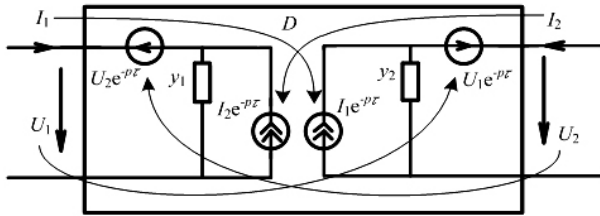


Рис. 5. Y-форма четырёхполюсника [12]  
Fig. 5. Y-shape of the quadripolar [12]

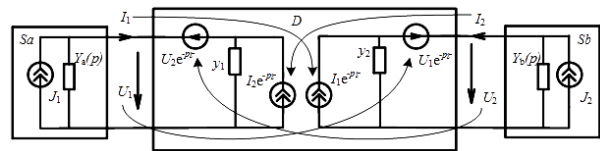


Рис. 6. Операторная форма разбитой на части системы [12]  
Fig. 6. Statement form of a partitioned system [12]

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{y_1 + y_2 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_1 + y_2) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} \\ -\frac{(y_1 + y_2) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_2 + y_1 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Как видно из рис. 4 и 5, фильтр  $D$  состоит из управляемых источников напряжения и тока, значения которых равны значениям соответствующих напряжений и токов на входах четырёхполюсника, задержанных на величину  $\tau$ . Сопротивления/проводимости  $z_1/y_1$  и  $z_2/y_2$  называются стабилизирующими элементами (параметрами). Значения стабилизирующих параметров существенно влияют на устойчивость и сходимость результатов полунатурного моделирования.

Разобьём исходную систему на части, используя четырёхполюсник  $D$ . Воспользуемся Y-формой четырёхполюсника поскольку на рис. 1 параметры исходной системы представлены в виде проводимостей.

Если в схеме, изображённой на рис. 6, задать значение  $y_1 = Y_b$ , то входные коэффициенты передачи четырёхполюсника по напряжению и току становятся равными  $U_2/U_1 = e^{-pt}$  и  $I_2/I_1 = -e^{-pt}$  соответственно, а входная проводимость равна  $I_1/U_1 = Y_b$ .

Если задать значение  $y_2 = Y_a$ , то выходные коэффициенты передачи четырёхполюсника, изображённого на рис. 6, по напряжению и току становятся равными  $U_1/U_2 = e^{-pt}$  и  $I_1/I_2 = -e^{-pt}$  соответственно, а выходная проводимость равна  $I_2/U_2 = Y_a$ . Другими словами, четырёхполюсник ста-

новится идеальной линией задержки. Это, в свою очередь, значит, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) не зависит от частоты, а фазо-частотная характеристика (ФЧХ) изменяется прямо пропорционально частоте, причём коэффициент пропорциональности — время задержки.

Исследуя полюсы передаточных функций цепи, изображённой на рис. 6, можно получить выражение вида:

$$p = \frac{-\ln\left(\frac{(Y_b + y_2)(Y_a + y_1)}{(y_2 - Y_a)(y_1 - Y_b)}\right)}{2\tau}.$$

Как известно, система устойчива, если полюс  $p$  передаточной функции лежит в левой полуплоскости [13], а это будет выполнено, если будет выполняться условие:

$$\frac{(y_2 - Y_a)(y_1 - Y_b)}{(Y_b + y_2)(Y_a + y_1)} < 1. \quad (2)$$

Если сравнить полученное выражение (2) с выражениями и результатами, полученными в [11], то увидим, что они не противоречат друг другу. Поэтому требование о том, что фильтр  $D$  должен играть роль идеальной линии задержки, эквивалентно требованию обращения в ноль всех собственных чисел матрицы перехода  $W$  [11] и требованию, чтобы все полюсы передаточной функции были расположены в левой полуплоскости на  $-0$ .

Необходимо отметить, что, поскольку разбитая на части система отличается от исходной появлением в ней идеальной линии задержки, то процессы в этих системах будут отличаться друг от друга. Причём основное отличие будет заключаться в задержке сигнала на величину  $\tau$ . Гипотетически можно представить, что в исходной системе появился ещё один реактивный элемент, что делает предложенный подход похожим на TLM интерфейс.

До сих пор разбитая на части система рассматривалась в операторной области. При её моделировании на компьютере с помощью численных методов интегрирования дифференциальных уравнений задаётся шаг моделирования  $h$ ; реактивные элементы системы заменяются их моделями, состоящими из активных элементов и управляемых источников тока или напряжения.

Таким образом,  $Y_a$  и  $Y_b$  становятся действительными числами, следовательно, стабилизирующие параметры  $y_1$  и  $y_2$  тоже должны быть действительными числами, и это, с точки зрения реализации их в аппаратной части интерфейса, положительный момент. Отрицательный момент заключается в том, что область устойчивости выбранного численного метода интегрирования дифференциальных уравнений начинает влиять на устойчивость разбитой на части системы. Необходимо также отметить, что когда четырёхполюсник функционировал в режиме идеальной линии задержки, то токи, протекающие через  $y_1$  и  $y_2$ , минимальны и прямо пропорциональны скорости изменения независимых источников, т.е. потери энергии в линии задержки минимальны.

Предположим, что для исходной системы с помощью метода узловых потенциалов была составлена система уравнений вида  $(G + pC)U = J$ . После перехода во временную область и применения обратной формулы Эйлера получим систему ли-

нейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида  $(C/h+G)u_{n+1} = (C/h)u_n + j_{n+1}$ , где  $h$  — выбранный шаг моделирования [14].

Пусть поведение фрагментов  $Sa$  и  $Sb$  описывается, например, матрицами 2-го порядка (порядок матриц на самом деле не важен и может быть выбран любым). Поскольку между частями системы имеется однопортовое соединение, то переставляя строки и столбцы матрицы, описывающей поведение исходной (не разбитой на части) системы, её можно привести к виду:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} + b_{11} & b_{12} \\ 0 & b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k + j_{33}^k \\ j_{44}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} + j_3^{k+1} \\ j_4^{k+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

или, если в явном виде выразить ток  $i_1$ , протекающий между частями системы  $Sa$  и  $Sb$ , в виде:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_{11} & b_{12} \\ 0 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ i_1^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k \\ 0 \\ j_{33}^k \\ j_{44}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ 0 \\ j_3^{k+1} \\ j_4^{k+1} \end{bmatrix},$$

где  $k$  —  $k$ -й момент времени;  $u_{nn}^{k+1}$  — узловые потенциалы;  $j_{nn}^k = (C/h)u_n + j_n^{k+1}$  — зависимые и независимые источники тока, подключённые к соответствующим узлам цепи;  $a_{nn}$  и  $b_{nn}$  — действительные коэффициенты матрицы  $(C/h + G)$ , полученной в результате замены активных и реактивных элементов системы их моделями.

Тогда система, разбитая с помощью четырёхполюсника  $D$  на части, будет описываться системой уравнений, приведенной ниже:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{y_1 + y_2 z^{-2}}{1 - z^{-2}} & -\frac{(y_1 + y_2)z^{-1}}{1 - z^{-2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{(y_1 + y_2)z^{-1}}{1 - z^{-2}} & \frac{y_2 + y_1 z^{-2}}{1 - z^{-2}} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & b_{11} & b_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ i_1^{k+1} \\ u_1^{k+1} \\ u_2^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ j_{33}^k \\ j_{44}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ j_3^{k+1} \\ j_4^{k+1} \end{bmatrix}.$$

В системе в явном виде выражены значения токов  $i_1^{k+1}$ ,  $i_2^{k+1}$  и напряжений  $u_1^{k+1}$ ,  $u_2^{k+1}$  на входе и выходе четырёхполюсника  $D$ .

Преобразуя полученную систему, приведём её к виду:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & b_{11} & b_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ i_1^{k+1} \\ u_1^{k+1} \\ u_2^{k+1} \\ i_2^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k \\ 0 \\ i_1^{k-1} - y_2 u_1^{k-1} + (y_2 + y_1) u_2^k \\ i_2^{k-1} - y_1 u_2^{k-1} + (y_2 + y_1) u_1^k \\ 0 \\ j_{33}^k \\ j_{44}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ j_3^{k+1} \\ j_4^{k+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (3), система распалась на два фрагмента, которые решаются независимо друг от друга и на каждом временном шаге обмениваются данными друг с другом через управляемые источники тока, зависящие от токов и напряжений на входе четырёхполюсника в предыдущие моменты времени. Данное преобразование можно считать переходом от операторного представления идеальной линии задержки к её модели.

Фактически (4) можно рассматривать как способ решения исходного СЛАУ (3) с помощью итерационного метода, причём когда четырёхполюсник  $D$  функционирует в режиме идеальной линии задержки, то при одной итерации на каждом временном шаге (имитация НЛ) полученное решение с учётом задержки на величину  $\tau$  совпадает с решением исходной системы. Если бы была возможность выполнить вторую итерацию, то решения совпали бы полностью. Таким образом, итерационный метод трансформируется в прямой метод решения СЛАУ, так как решение находится всегда за две итерации. Если выполняется хотя бы одно из условий  $y_1 = Y_b$  или  $y_2 = Y_a$ , то решение всегда находится за две или три итерации в зависимости от того, в каком фрагменте системы находится независимый источник и какое из двух условий выполнено. Если не выполняется ни одно из условий  $y_1 = Y_b$ ,  $y_2 = Y_a$ , но выполняется условие (2), то итерационный процесс устойчив и сходится к решению за несколько (больше трёх) итераций [12, 16]. Следовательно, при выполнении этих условий процесс моделирования НЛ системы также будет устойчив и будет сходиться к результатам моделирования исходной системы, причём скорость сходимости будет тем выше, чем строже выполняется неравенство (2).

Вычислить значения  $Y_a$  и  $Y_b$  системы как отношения входного тока к напряжению можно с помощью выражений (в литературе по численным методам решения СЛАУ их называют дополнением Шура [15]), приведённых ниже:

$$Y_a = A/a_{11} = (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})/a_{11} = \det(a)/a_{11} = a_{22} - a_{12}a_{11}^{-1}a_{21},$$

$$Y_b = B/b_{22} = (b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21})/b_{22} = \det(b)/b_{22} = b_{11} - b_{12}b_{22}^{-1}b_{21}. \quad (5)$$

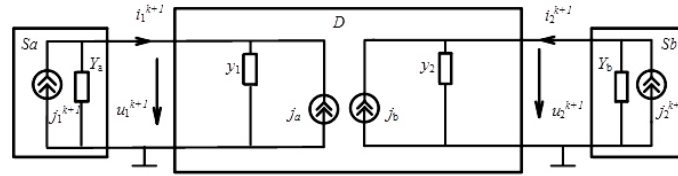


Рис. 7. Эквивалентная схема разбитой на части системы  
 Fig. 7. Equivalent scheme of a partitioned system

Далее, устанавливая значения  $y_1 = Y_b, y_2 = Y_a$ , можно обеспечить работу четырёхполюсника в режиме идеальной линии задержки. Таким образом, вычисляя значения стабилизирующих параметров до начала моделирования с помощью (5), можно добиться того, что четырёхполюсник  $D$ , изображённый на рис. 7, будет функционировать в режиме идеальной линии задержки, где  $y_1 = Y_b, j_a = i_1^{k-1} - y_2 u_1^{k-1} + (y_2 + y_1) u_2^k$  могут быть численно учтены в модели  $Sa$  ( $j_a$  вычисляется на основе вычисленных значений  $i_1^{k-1}, u_1^{k-1}$  и измеренного значения  $u_2^k$ );  $y_2 = Y_a, j_b = i_2^{k-1} - y_1 u_2^{k-1} + (y_1 + y_2) u_1^k$  — это физические объекты аппаратной части ( $y_2$  — проводимость,  $j_b$  — управляемый источник тока, значение которого зависит от измеренных ранее значений  $i_2^{k-1}, u_2^{k-1}$  и вычисленного значения  $u_1^k$ ).

Кроме того,  $y_2$  можно рассматривать как сумму  $y_j + \Delta y$ , где  $y_j$  — внутренняя проводимость реального источника тока, который моделируется с помощью идеального источника  $j_b$ , а  $\Delta y$  — дополнительная/внешняя проводимость. Отсюда следует, что  $y_j$  должно быть меньше  $y_2$  иначе выбранный реальный источник тока не может быть использован в программно-аппаратном интерфейсе, так как его мощности недостаточно.

Поскольку предполагается, что фрагмент системы  $Sa$  моделируется на компьютере, то найти значение  $Y_a$  с помощью (5) не представляет труда. Найти значение  $Y_b$  труднее, так как  $Sb$  — это реальный физический объект, т.е., чтобы найти  $Y_b$ , нужно построить его математическую модель.

Тем не менее даже если задать значения стабилизирующих параметров следующим образом:  $y_1 = y_2$  и их значение лежит в диапазоне  $[Y_a, Y_b]$ , то

разбитая на части система всё равно будет продолжать оставаться устойчивой, а результаты моделирования будут эквивалентны результатам моделирования исходной системы [12, 16].

### 3. Многополюсное представление фильтра

Рассмотрим более общий случай, когда фрагменты исходной системы представляют собой  $N$ -полюсники. В этом случае фильтр тоже должен быть  $2xN$ -полюсником. Матрица проводимости такого фильтра формируется из  $(N-1)^2$  матриц следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Y1_{11} & Y1_{12} \\ Y1_{21} & Y1_{22} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Y1_{11} & Y2_{11} & Y1_{12} & Y2_{12} \\ Y3_{11} & Y4_{11} & Y3_{12} & Y4_{12} \\ Y1_{21} & Y2_{21} & Y1_{22} & Y2_{22} \\ Y3_{21} & Y4_{21} & Y3_{22} & Y4_{22} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Y1_{11} & Y2_{11} & Y3_{11} & Y1_{12} & Y2_{12} & Y3_{12} \\ Y4_{11} & Y5_{11} & Y6_{11} & Y4_{12} & Y5_{12} & Y6_{12} \\ Y7_{11} & Y8_{11} & Y9_{11} & Y7_{12} & Y8_{12} & Y9_{12} \\ Y1_{21} & Y2_{21} & Y3_{21} & Y1_{22} & Y2_{22} & Y3_{22} \\ Y4_{21} & Y5_{21} & Y6_{21} & Y4_{22} & Y5_{22} & Y6_{22} \\ Y7_{21} & Y8_{21} & Y9_{21} & Y7_{22} & Y8_{22} & Y9_{22} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

если фрагменты системы являются  $N = 2, 3$  и  $4$ -полюсниками соответственно, где  $Y_l$  — двумерные матрицы вида (1);  $l = 1, \dots, 9$ . Рассуждая аналогичным образом, можно сформировать матрицу параметров  $2xN$ -полюсника при любом  $N$ .

Так, в частности, если фрагменты системы будут трёхполюсниками, то матрица проводимости фильтра будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{bmatrix} Y1_{11} & Y2_{11} & Y1_{12} & Y2_{12} \\ Y3_{11} & Y4_{11} & Y3_{12} & Y4_{12} \\ Y1_{21} & Y2_{21} & Y1_{22} & Y2_{22} \\ Y3_{21} & Y4_{21} & Y3_{22} & Y4_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_1 + y_2 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_3 + y_4 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_1 + y_2) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_3 + y_4) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} \\ \frac{y_5 + y_6 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_7 + y_8 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_5 + y_6) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_7 + y_8) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} \\ -\frac{(y_1 + y_2) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_3 + y_4) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_2 + y_1 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_4 + y_3 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} \\ -\frac{(y_5 + y_6) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & -\frac{(y_7 + y_8) e^{-pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_6 + y_5 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} & \frac{y_8 + y_7 e^{-2pt}}{1 - e^{-2pt}} \end{bmatrix},$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_8$  — стабилизирующие параметры.

Если поведение трёхполюсников (частей исходной системы) описывается, например, матрицами 3-го порядка (порядок матриц значения не имеет)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} + b_{11} & a_{23} + b_{12} & b_{13} \\ a_{31} & a_{32} + b_{21} & a_{33} + b_{22} & b_{23} \\ 0 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ u_{66}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k + j_{33}^k \\ j_{44}^k + j_{55}^k \\ j_{66}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} + j_3^{k+1} \\ j_4^{k+1} + j_5^{k+1} \\ j_6^{k+1} \end{bmatrix},$$

и между ними имеется двухпортовое соединение, то, переставляя соответствующим образом строки и столбцы матрицы, представляющей поведение исходной системы, её можно привести к виду:

или, если в явном виде выразить токи  $i_1, i_2$ , протекающие между частями системы, то

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & u_{44}^{k+1} & j_{44}^k & j_4^{k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & u_{55}^{k+1} & j_{55}^k & j_5^{k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} & u_{66}^{k+1} & j_{66}^k & j_6^{k+1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ i_1^{k+1} \\ i_2^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \\ u_{55}^{k+1} \\ u_{66}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k \\ j_{33}^k \\ 0 \\ 0 \\ j_{44}^k \\ j_{55}^k \\ j_{66}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ j_3^{k+1} \\ 0 \\ 0 \\ j_4^{k+1} \\ j_5^{k+1} \\ j_6^{k+1} \end{bmatrix},$$

где  $k$  —  $k$ -й момент времени;  $u_{nn}^{k+1}$  — узловые потенциалы;  $j_{nn}^k = (C/h)u_n^k$ ,  $j_n^{k+1}$  — зависимые и независимые источники тока, подключённые к соответствующим узлам цепи;  $a_{nn}$  и  $b_{nn}$  — действительные коэффициенты матрицы  $(C/h + G)$ , полученной

в результате замены активных и реактивных элементов системы их моделями.

Тогда система, разбитая с помощью шестиполосника  $D$  на части, будет описываться системой уравнений, приведенной ниже:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & Y_{1,11} & Y_{2,11} & Y_{1,12} & Y_{2,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & Y_{3,11} & Y_{4,11} & Y_{3,12} & Y_{4,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{1,21} & Y_{2,21} & Y_{1,22} & Y_{2,22} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{3,21} & Y_{4,21} & Y_{3,22} & Y_{4,22} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & u_{44}^{k+1} & j_{44}^k & j_4^{k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & u_{55}^{k+1} & j_{55}^k & j_5^{k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} & u_{66}^{k+1} & j_{66}^k & j_6^{k+1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ i_1^{k+1} \\ i_2^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \\ u_{55}^{k+1} \\ u_{66}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k \\ j_{33}^k \\ 0 \\ 0 \\ j_{44}^k \\ j_{55}^k \\ j_{66}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ j_3^{k+1} \\ 0 \\ 0 \\ j_4^{k+1} \\ j_5^{k+1} \\ j_6^{k+1} \end{bmatrix}.$$

Преобразуем полученную систему, т.е. перейдем от операторного представления идеальной ли-

нии задержки к её модели, получим выражение вида:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & y_1 & y_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & y_5 & y_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_2 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_6 & y_8 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & u_{44}^{k+1} & j_{44}^k & j_4^{k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & u_{55}^{k+1} & j_{55}^k & j_5^{k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{31} & b_{32} & b_{33} & u_{66}^{k+1} & j_{66}^k & j_6^{k+1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11}^{k+1} \\ u_{22}^{k+1} \\ u_{33}^{k+1} \\ i_1^{k+1} \\ i_2^{k+1} \\ u_{44}^{k+1} \\ u_{55}^{k+1} \\ u_{66}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_{11}^k \\ j_{22}^k \\ j_{33}^k \\ 0 \\ 0 \\ j_{44}^k \\ j_{55}^k \\ j_{66}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j_1^{k+1} \\ j_2^{k+1} \\ j_3^{k+1} \\ 0 \\ 0 \\ j_4^{k+1} \\ j_5^{k+1} \\ j_6^{k+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_1^{k-1} - y_2 u_1^{k-1} - y_4 u_2^{k-1} + (y_1 + y_2) u_3^k + (y_3 + y_4) u_4^k \\ i_2^{k-1} - y_6 u_1^{k-1} - y_8 u_2^{k-1} + (y_5 + y_6) u_3^k + (y_7 + y_8) u_4^k \\ i_3^{k-1} - y_1 u_3^{k-1} - y_3 u_4^{k-1} + (y_1 + y_2) u_1^k + (y_3 + y_4) u_2^k \\ i_4^{k-1} - y_5 u_3^{k-1} - y_7 u_4^{k-1} + (y_5 + y_6) u_1^k + (y_7 + y_8) u_2^k \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Если, как показано ниже, вычислить, используя дополнения Шура, матрицы  $Y_a$ ,  $Y_b$  фрагментов системы и задать значения параметров  $y_2$ ,  $y_4$ ,  $y_6$ ,  $y_8$  и  $y_1$ ,  $y_3$ ,  $y_5$ ,  $y_7$ , равными соответствующим коэффициентам этих матриц, следующим образом:

$$\begin{bmatrix} y_1 & y_3 \\ y_5 & y_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} - \frac{\begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}}{b_{33}},$$

$$\begin{bmatrix} y_2 & y_4 \\ y_6 & y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} - \frac{\begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} \end{bmatrix}}{a_{11}},$$

то фильтр  $D$  будет играть роль идеальной линии задержки. В этом можно убедиться, если по аналогии с четырёхполосным вариантом фильтра найти коэффициенты передачи по напряжению, току и входные, выходные проводимости нагруженного

шести полюсника  $D$ , а также полюсы одной из передаточных функций фильтра.

Поскольку предполагается, что часть ( $Y_a$ ) фильтра  $D$  будет реализована в интерфейсе в виде реальных физических устройств (проводимостей и управляемых источников тока), то необходимо убедиться, что полученные коэффициенты матрицы  $Y_a$  позволят это сделать, т.е.  $Y_a$  физически реализуема и описывает поведение линейной цепи, уравнения которой в данном случае были сформированы методом узловых напряжений.

Часть ( $Y_a$ ) будет физически реализуема, если матрица  $Y_a$  симметрична относительно главной диагонали. На главной диагонали матрицы должны стоять положительные элементы, равные сумме проводимостей всех ветвей, подключённых к  $i$ -му узлу цепи, а остальные элементы матрицы — это взаимные проводимости между  $i$ -м и  $j$ -м узлами цепи, равные сумме проводимостей всех ветвей, включённых непосредственно между этими узлами, взятые с противоположным знаком [13].

Если матрицы  $Y_a, Y_b$  удовлетворяют описанным выше требованиям, то эквивалентная схема разбитой на части системы будет выглядеть, как показано на рис. 8, где  $y_{35} = -y_3; y_{46} = -y_3; y_{11} = y_1 - y_{35}; y_{77} = y_7 - y_{35}; y_{22} = y_2 - y_{46}; y_{88} = y_8 - y_{46}$ , а источники тока  $j_1, j_2, j_3, j_4$  соответственно равны:

$$\begin{aligned} j_1 &= i_1^{k-1} - y_2 u_1^{k-1} - y_4 u_2^{k-1} + (y_1 + y_2) u_3^k + (y_3 + y_4) u_4^k, \\ j_2 &= i_2^{k-1} - y_6 u_1^{k-1} - y_8 u_2^{k-1} + (y_5 + y_6) u_3^k + (y_7 + y_8) u_4^k, \\ j_3 &= i_3^{k-1} - y_1 u_3^{k-1} - y_3 u_4^{k-1} + (y_1 + y_2) u_1^k + (y_3 + y_4) u_2^k, \\ j_4 &= i_4^{k-1} - y_5 u_3^{k-1} - y_7 u_4^{k-1} + (y_5 + y_6) u_1^k + (y_7 + y_8) u_2^k. \end{aligned}$$

Причём фрагмент эквивалентной схемы, присоединённый к части  $Sa$ , может быть численно учтен в её модели, а фрагмент, присоединённый к  $Sb$ , должен быть реализован в виде аппаратной части.

Таким образом, руководствуясь изложенным выше принципом (6), можно сформировать ма-

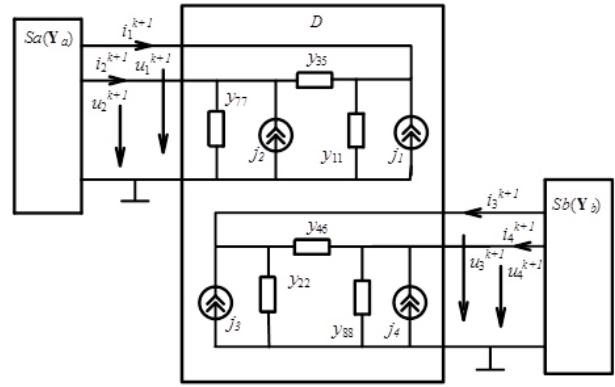


Рис. 8. Эквивалентная схема фильтра  $D$  при объединении трёхполюсников  
 Fig. 8. Equivalent scheme of the  $D$  filter at the three-pole coupling

трицу параметров  $2 \times N$ -полюсного фильтра в  $Y$  или  $Z$ -форме. На основании полученной матрицы составить эквивалентную схему фильтра и с её помощью провести НЛ-моделирование исходной системы, разбитой на два  $N$ -полюсника. При этом процесс полунатурного моделирования будет устойчив и эквивалентен процессу моделирования исходной системы.

#### 4. Имитация полунатурного моделирования нелинейной системы

Используем фильтр  $D$  и промоделируем по частям в среде MATLAB трёхфазный инвертор, изображённый на рис. 9. При моделировании по частям фрагменты системы будут обмениваться данными на каждом временном шаге только один раз, что соответствует процессам, протекающим в системе при её полунатурном моделировании.

Значение параметров следующее:  $Y_{da} = Y_{db} = Y_{dc} = 1e+3$  См;  $L_{da} = L_{db} = L_{dc} = 316e-6$  Гн;  $Y_{ga} = Y_{gb} = Y_{gc} = 100$  См;  $L_{ga} = L_{gb} = L_{gc} = 0,5e-3$  Гн;

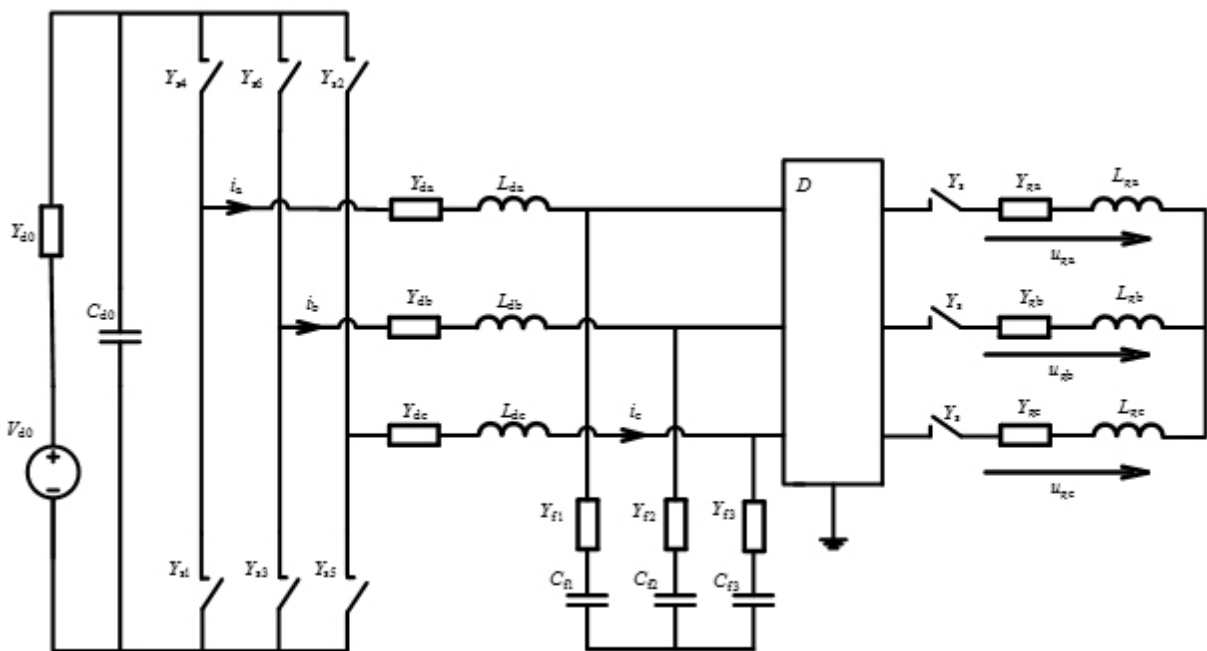
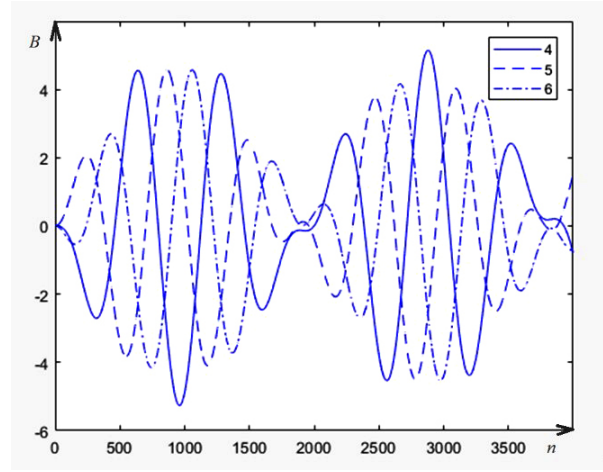
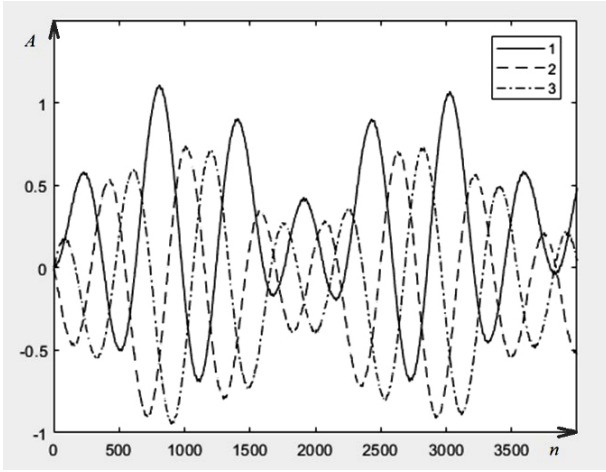
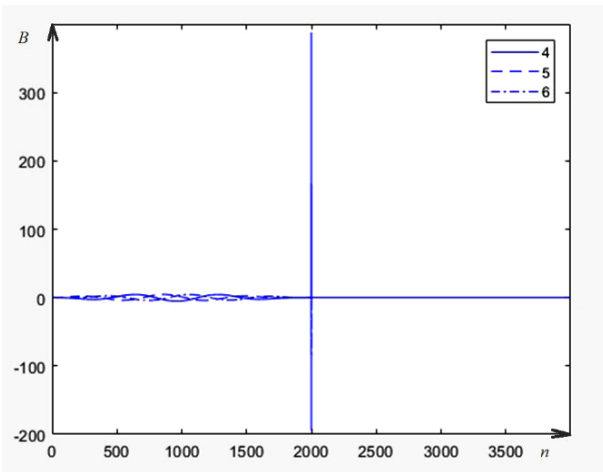
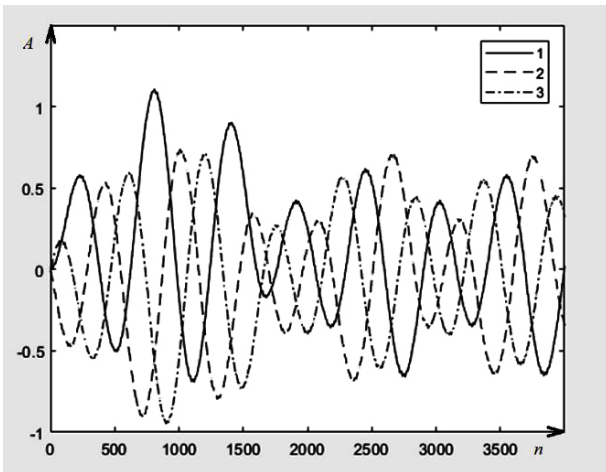


Рис. 9. Схема инвертора, разбитая на две части с помощью фильтра ( $D$ )  
 Fig. 9. Inverter scheme divided into two parts by filter ( $D$ )



а) б)  
 Рис. 10. Зависимости токов (а) и напряжений (б) от номера шага интегрирования при  $Y_s = \text{close}$ : 1 —  $i_a$ ; 2 —  $i_b$ ; 3 —  $i_c$ ; 4 —  $u_a$ ; 5 —  $u_b$ ; 6 —  $u_c$   
 Fig. 10. Dependences of currents (a) and voltages (б) on the integration step number at  $Y_s = \text{close}$ : 1 —  $i_a$ ; 2 —  $i_b$ ; 3 —  $i_c$ ; 4 —  $u_a$ ; 5 —  $u_b$ ; 6 —  $u_c$



а) б)  
 Рис. 11. Зависимости токов (а) и напряжений (б) от номера шага интегрирования при  $Y_s = \text{close}$  (номер шага интегрирования от 1 до 2000), при  $Y_s = \text{open}$  (номер шага интегрирования от 2001 до 4000): 1 —  $i_a$ ; 2 —  $i_b$ ; 3 —  $i_c$ ; 4 —  $u_a$ ; 5 —  $u_b$ ; 6 —  $u_c$   
 Fig. 11. Dependences of currents (a) and voltages (б) on the integration step number at  $Y_s = \text{open}$  (integration step number from 1 to 2000), at  $Y_s = \text{open}$  (integration step number from 2001 to 4000): 1 —  $i_a$ ; 2 —  $i_b$ ; 3 —  $i_c$ ; 4 —  $u_a$ ; 5 —  $u_b$ ; 6 —  $u_c$

$Y_{f1} = Y_{f2} = Y_{f3} = 200 \text{ См}$ ;  $C_{f1} = C_{f2} = C_{f3} = 15e-6 \text{ Ф}$ ;  
 $C_{d0} = 470e-6 \text{ Ф}$ ;  $Y_{d0} = 1e+4 \text{ См}$ ;  $V_{d0} = 10 \text{ В}$ .

Ключи  $Y_{s1}$ ,  $Y_{s1} - Y_{s6}$  моделируются с помощью проводимостей, которые могут принимать значения  $\text{close} = 1e+9 \text{ См}$  или  $\text{open} = 1e-9 \text{ См}$ . Ключи  $Y_{s1} - Y_{s6}$  открываются и закрываются в соответствии с управляющими сигналами, которые позволяют реализовать широтно-импульсную модуляцию.

Для того чтобы обеспечить устойчивость разбитой на части системы, необходимо определить значение стабилизирующих параметров фильтра  $D$ , т.е. коэффициенты матриц  $Y_a$  и  $Y_b$  для системы, изображённой на рис. 9. Как известно, эти коэффициенты можно вычислить, используя дополнение Шура.

Поскольку трёхфазный инвертор — это нелинейная система, то она будет иметь шесть вариантов матрицы  $Y_a$  (существует шесть вариантов открытых/закрытых ключей  $Y_{s1} - Y_{s6}$ ) и два варианта матрицы  $Y_b$  (при  $Y_s = \text{open}$ ,  $Y_s = \text{close}$ ).

При данном варианте разбиения системы на части матрицы  $Y_a$  будут отличаться друг от друга

в пятом знаке после запятой, поэтому приведём значение только одной из них:

$$Y_{a1} = \begin{bmatrix} 17,3923 & -8,69565 & -8,69565 \\ -8,69565 & 17,3923 & -8,69565 \\ -8,69565 & -8,69565 & 17,3923 \end{bmatrix}$$

Матрица  $Y_b$  в зависимости от положения ключа  $Y_s$  ( $Y_s = \text{close}$ ,  $Y_s = \text{open}$ ) будет равна:

$$Y_{b\_close} = \begin{bmatrix} 9,99928e-04 & 0 & 0 \\ 0 & 9,99928e-04 & 0 \\ 0 & 0 & 9,99928e-04 \end{bmatrix},$$

$$Y_{b\_open} = \begin{bmatrix} 1,00000e-11 & 0 & 0 \\ 0 & 1,00000e-11 & 0 \\ 0 & 0 & 1,00000e-11 \end{bmatrix}.$$

Как видно из значений коэффициентов матриц  $Y_{a1}$  (также  $Y_{b\_close}$ ,  $Y_{b\_open}$ ), она позволяет реализовать

её в виде линейной цепи в аппаратном интерфейсе HIL-системы. В данном случае с учётом округления проводимости эквивалентной схемы, соединённые с  $i$ -м узлом и «землёй», будут равны 0,001 См, а значения проводимостей, включённых между  $i$ -м и  $j$ -м узлами, будут равны 8,69565 См.

На рис. 10 и рис. 11 приведены результаты моделирования системы (фрагменты переходных процессов при включении инвертора и коммутации его ключа  $Y_s$ ) [17], изображённой на рис. 9 по частям. В качестве стабилизирующих параметров были взяты матрицы  $Y_a = Y_{a1}$  и  $Y_b = Y_{b\_close}$ . Как показали численные эксперименты, система устойчива, а результаты совпадают с результатами исходной системы с учётом задержки на величину  $\tau$ .

Кроме приведённого выше варианта разбиения инвертора на части, проводились численные эксперименты, при которых фильтр  $D$  вставлялся в исходную систему сразу перед проводимостями  $Y_{da'}$ ,  $Y_{db'}$ ,  $Y_{dc}$  или сразу после индуктивностей  $L_{da'}$ ,  $L_{db'}$ ,  $L_{dc}$ . В любом из этих вариантов разбиения системы на части результаты моделирования были устойчивыми и совпадали друг с другом.

### Заключение

В статье предложен принцип формирования  $2xN$ -полюсного фильтра, который может обеспечить устойчивость, а также сходимость результатов HIL-моделирования. Показан способ определения его стабилизирующих параметров. Указано, что при этих параметрах фильтр является идеальной линией задержки, т.е. АЧХ фильтра не зависит от частоты, а ФЧХ изменяется прямо пропорционально частоте, причём коэффициент пропорциональности — время задержки.

Результаты, полученные в статье, согласуются с общеизвестными результатами в области теории цепей и численных методов решения СЛАУ.

С помощью численного примера показана адекватность, полученных в статье теоретических результатов, а также продемонстрирована возможность использования фильтра при HIL-моделировании нелинейных систем. Применение полученных результатов на практике может расширить область применения HIL-моделирования при тестировании оборудования, отработки алгоритмов управления, моделировании работы реальных устройств.

В заключение хотелось бы отметить, что рассматриваемый  $2xN$ -полюсный фильтр при правильно выбранных параметрах обладает некоторыми предельными характеристиками. В данном случае является идеальной линией задержки или даже фильтром чистой задержки, так как его АЧХ постоянна и равна единице. Следовательно, рассматриваемый  $2xN$ -полюсный фильтр можно назвать multipole pure delay фильтр (mpprd-фильтр).

### Благодарности / Acknowledgements

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гос. рег. 125011200147-2.

The publication has been prepared within the framework of the implementation of the GS of UNC RAS, state reg. no. 125011200147-2.

### Список источников / References

1. Wei Ren. Accuracy evaluation of power Hardware-in-the-Loop (PHIL) simulation. Florida State University, 2007. 68 p. URL:

<https://repository.lib.fsu.edu/islandora/object/fsu%3A176356> (accessed: 14.04.2025).

2. Дмитриев-Здоров В. Б. Многоуровневое обобщение класса релаксационных алгоритмов для анализа электрических цепей: дис. ... д-ра техн. наук. Таганрог: Изд-во Таганрогского радиотехнического ун-та, 1998. 277 с.

Dmitriyev-Zdorov V. B. Mnogourovnevoye obobshcheniye klassa relaksatsionnykh algoritmov dlya analiza elektricheskikh tsepey [Multilevel generalisation of a class of relaxation algorithms for the analysis of electric circuits]. Taganrog, 1998. 277 p. (In Russ.).

3. Денисенко В. В. Методы моделирования СБИС с использованием полунатурной модели МОП-транзистора: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. 349 с.

Denisenko V. V. Metody modelirovaniya SBIS s ispol'zovaniyem polunaturnoy modeli MOP-tranzistora [VLSI modelling methods using semi-natural MOSFET model]. Taganrog, 2010. 349 p. (In Russ.).

4. Максимов М. Н., Мережин Н. И., Федосов В. П. [и др.]. Эквивалентная схема сшивающего четырехполюсника // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 2. С. 162–169. DOI: 10.7868/S0033849416020030. EDN: VCPNHL.

Maximov M. N., Merezhin N. I., Fedosov. V. P. [et al.]. Ekvivalentnaya skhema sshivayushchego chetyrekhpolyusnika [The equivalent circuit of a joining two-port]. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2016. Vol. 61, no 2. P. 162–169. DOI: 10.7868/S0033849416020030. EDN: VCPNHL. (In Russ.).

5. Maksimov M., Lyashev V., Merezhin N. [et al.]. Poincare-Steklov filter in Hardware-in-the-Loop modeling // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Astana, Kazakhstan, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998531.

6. Santi E., Siegers J. Improved power Hardware-in-the-Loop interface algorithm using wideband system identification. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2014. P. 1198–1204. DOI: 10.1109/APEC.2014.6803459.

7. Tucker J. Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) considerations and implementation methods for electrically coupled systems. University of South Carolina, 2011. URL: <https://scholarcommons.sc.edu/etd/2207> (accessed: 14.04.2025).

8. Mersenski R. Evaluation of a new power Hardware-in-the-Loop (PHIL) interface algorithm for current controlled amplifiers. University of South Carolina, 2011. URL: <https://scholarcommons.sc.edu/etd/2196> (accessed: 14.04.2025).

9. Paran S., Edringto C. Improved power Hardware-in-the-Loop interface methods via impedance matching. 2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). 2013. P. 342–346. DOI: 10.1109/ESTS.2013.6523758.

10. Lauss G., Strunz K. Accurate and stable Hardware-in-the-Loop (HIL) real-time simulation of integrated power electronics and power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. Vol. 36, no. 9. P. 1–1. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3040071.

11. Попов В. П., Максимов М. Н., Мережин Н. И. Об устойчивости и сходимости моделирования по частям // Вестник Южного научного центра РАН. 2005. Т. 1, № 3. С. 11–21. EDN: KYWFIP.

Popov V. P., Maksimov M. N., Merezhin N. I. Ob ustoychivosti i skhodimosti modelirovaniya po chastyam [About stability and convergence of modeling by parts]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN. Science in the South of Russia*. 2005. Vol. 1, no. 3. P. 11–21. EDN: KYWFIP. (In Russ.).

12. Максимов М. Н. Применение четырёхполюсника Пуанкаре – Стеклова для построения интерфейса при полунатурном моделировании систем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 6 (223). С. 43–52. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-6-43-52. EDN: OBQHZR.

Maksimov M. N., Maksimova S. M. Primeneniye chetyrekhpolyusnika Puankare-Steklova dlya postroyeniya interfeysa pri polunaturnom modelirovanii sistem [Application of the four-pole Poincare–Steklov in interface construction for

Hardware-in-the-Loop simulation]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2021. No. 6 (223). P. 43–52. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-6-43-52. EDN: OBQHZR. (In Russ.).

13. Попов В. П. Основы теории цепей. Москва: Высшая школа, 2003. 575 с.

Popov V. P. *Osnovy teorii tsepey* [Principles of the circuit theory]. Moscow, 2003. 575 p. (In Russ.).

14. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. А. Ф. Обьедков; под ред. А. А. Туркина. Москва: Радио и связь, 1988. 560 с.

Vlakh I., Singkhal K. *Mashinnyye metody analiza i proyektirovaniya elektronnykh skhem* [Machine methods of analysis and design of electronic circuits] // trans. from Engl. by A. F. Obedkov; ed. by A. A. Turkin. Moscow, 1988. 560 p. (In Russ.).

15. Лаевский Ю. М. О некоторых итогах развития современной вычислительной математики // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7, № 2. С. 74–83. EDN: KZAQCB.

Laevsky Yu. M. *O nekotorykh itogakh razvitiya sovremennoy vychislitel'noy matematiki* [On some conclusions of numerical mathematics development]. *Vychislitel'nyye tekhnologii. Journal of Computational Technologies*. 2002. Vol. 7, no. 2. P. 74–83. EDN: KZAQCB. (In Russ.).

16. Максимов М. Н. Программа для полунатурного моделирования системы с использованием интерфейсов, построенных на базе четырёхполюсника Пуанкаре–Стеклова: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667901; заявл. 29.10.2021; опубл. 08.11.2021. Москва: ФИПС, 2021. Бюл. 11.

Maksimov M. N. *Programma dlya polunaturnogo modelirovaniya sistemy s ispol'zovaniyem interfeysov, postroyennykh na baze chetyrkhpolusnika Puankare-Steklova* [Program for semi-natural modelling of the system using interfaces based on the Poincare–Stecklov quadropole]: Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2021667901; filed October 29th, 2021; published November 08th, 2021. Moscow: FIPS, 2021. (In Russ.).

17. Максимов М. Н., Максимова С. М. Демонстратор применения многополюсного фильтра Пуанкаре–Стеклова для полунатурного моделирования трёхфазного инвертора: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684585; заявл. 15.11.2023; опубл. 16.11.2023. Москва: ФИПС, 2023. Бюл. 11.

Maksimov M. N., Maksimova S. M. *Demonstrator primeneniya mnogopolusnogo fil'tra Puankare–Steklova dlya polunaturnogo modelirovaniya trakhfaznogo invertora* [Demonstrator of

application of multipole Poincare-Stecklov filter for semi-natural modelling of three-phase inverter]: Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2023684585; filed November 15th, 2023; published November 16th, 2023. Moscow: FIPS, 2023. (In Russ.).

**МАКСИМОВ Михаил Николаевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретические основы радиотехники» Южного федерального университета, г. Таганрог.  
SPIN-код: 5092-3757

Адрес для переписки: maksimovm@mail.ru

**МАКСИМОВА София Михайловна**, инженер-исследователь Федерального исследовательского центра Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

Адрес для переписки: sofiamaksimova.2003@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 14.01.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 06.05.2025.

**MAKSIMOV Mikhail Nikolayevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Theoretical Bases of Radio Engineering Department, Southern Federal University, Taganrog.  
SPIN-code: 5092-3757

Correspondence address: maksimovm@mail.ru

**MAKSIMOVA Sofiya Mikhaylovna**, Research Engineer, Federal Research Centre Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

Correspondence address: sofiamaksimova.2003@mail.ru

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

The article was submitted 14.01.2025; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 06.05.2025.

## АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РАДИОПРОДУКЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

А. А. Егорова, Л. Г. Варепо

Омский государственный технический университет, г. Омск

При разработке и производстве приборов и изделий электротехнической, авиационной и военной промышленности требуется тестирование готовой продукции на работоспособность и сохранение функциональных свойств в различных условиях эксплуатации. На сегодняшний день выпуск качественной и надежной продукции — это главная цель любого производства в нашей стране. Из-за ухода с российского рынка импортных поставщиков испытательного оборудования отечественные предприятия вынуждены искать новых поставщиков испытательного оборудования для тестирования своей продукции. В работе приводится сравнительный анализ тепло-влаги камер отечественного и зарубежного производств. Решение поставленной проблемы осуществлено путем проведения информационного анализа и синтеза данных с применением сравнительного метода.

**Ключевые слова:** испытательное оборудование, первичная аттестация, периодическая аттестация, повторная аттестация, климатические камеры, температура, влажность, испытание продукции.

**Для цитирования:** Егорова А. А., Варепо Л. Г. Анализ оборудования для испытаний радиопроductии на устойчивость к воздействию внешних факторов // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 107–112. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-107-112. EDN: KGPZMK.



© Егорова А. А., Варепо Л. Г., 2025.  
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR ASSESSING RADIO PRODUCT STABILITY UNDER EXTERNAL FACTORS

A. A. Egorova, L. G. Varepo

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The development and manufacture of devices and products in the electrical, aviation, and military industries necessitate rigorous testing of finished products to ensure operability and the preservation of functional properties under various operating conditions. In the current environment, producing high-quality and reliable products is a primary objective for any manufacturing operation in Russia. Due to the departure of imported test equipment suppliers from the Russian market, domestic enterprises are compelled to seek alternative sources for the test equipment required to evaluate their products. This paper presents a comparative analysis of heat and humidity chambers from both domestic and foreign manufacturers. The problem is addressed through information analysis and data synthesis using a comparative methodology.

**Keywords:** testing equipment, primary certification, periodic certification, re-certification, climatic chambers, temperature, humidity, product testing.

**For citation:** Egorova A. A., Varepo L. G. Analysis of equipment for assessing radio product stability under external factors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 107–112. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-107-112. EDN: KGPZMK.



© Egorova A. A., Varepo L. G., 2025.  
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

В связи с обострившимися отношениями с Западом и постоянным ростом курса валют у отечественных предприятий все большим спросом поль-

зуется испытательное оборудование отечественного производства, не уступающее по качеству импортному.

Цель работы — установить уровень обеспеченности российского рынка для проведения испытаний радиопродукции на устойчивость к воздействию внешних факторов. Объект исследования — состояние отрасли испытательного оборудования в России. Предмет исследования — тепло-влажная камера отечественного и зарубежного производства.

Испытательное оборудование предназначено для исследования влияния различных факторов окружающей среды на продукцию многих отраслей промышленности. Согласно ГОСТ Р 8.568–2017, испытательное оборудование — это средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний [1]. Испытательное оборудование представляет собой устройство, предназначенное для создания испытываемому изделию условий, близких к реальным условиям его эксплуатации для оценки его качества и работоспособности.

Условия испытаний — это совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях [1]. Стоит отметить, что имеющееся на рынке испытательное оборудование отличается большим разнообразием. Название испытательного оборудования, как правило, связано с создаваемыми в них воздействиями.

Сегодня существует большое количество различных классификаций испытательного оборудования, но среди них можно выделить три основных:

- механические (вибрационные установки и вибростенды, ударные установки и ударные стенды, акустические камеры и др.);

- электромагнитные (пробойные испытательные установки и др.);

- климатические камеры (термокамеры, влажкамеры, термовлажкамеры, камеры дождя, термобарокамеры, камеры пыли, камеры морского тумана и пр.).

Самый простой принцип действия у механического испытательного оборудования. Один из основных видов механических испытаний — испытание изделий на вибрационные нагрузки. Испытуемое изделие закрепляется в рабочей зоне и подвергается механическому воздействию.

Принцип действия электромагнитного испытательного оборудования заключается в создании и воздействии на изделие электромагнитных полей с различными параметрами.

Климатическое испытательное оборудование — это специализированное оборудование, представляющее собой закрытую систему для создания необходимых условий, близких к условиям эксплуатации для испытания изделия (рис. 1) [2].

Метод испытания машин, приборов и других технических изделий на устойчивость к воздействию верхнего и нижнего значений, изменения значений температуры среды при эксплуатации, транспортировании и хранении связан с условиями эксплуатации, а также транспортирования и хранения изделий, согласно ГОСТ 30630.2.1–2013 «Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры (издание с поправкой)» [3].

Так как температура является одним из наиболее значимых параметров, влияющих на работоспособность любого изделия, при производстве необходимо проводить испытания продукции для оценки его работоспособности в зависимости

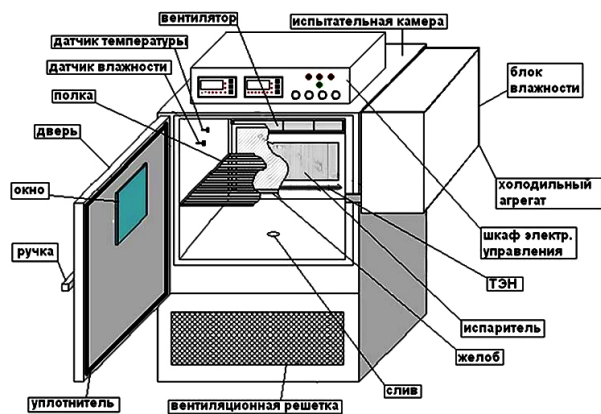


Рис. 1. Схема типовой климатической камеры  
Fig. 1. Scheme of a typical climatic chamber

от условий окружающей среды, при которой должно эксплуатироваться изделие. Испытания проводятся в специальных климатических камерах с возможностью контролировать и изменять такие параметры, как температура или влажность. Данные параметры могут быть изменены на различные значения для наблюдения за поведением продукта в соответствии с методикой проведения испытаний и условиями, в которых данная продукция будет эксплуатироваться согласно технической документации.

Испытуемое изделие помещается в рабочую зону камеры, где подвергается воздействию повышенной или пониженной температуры, влажности или давления. Климатические параметры устанавливаются в зависимости от реальных условий эксплуатации изделия. В работах [4, 5] при оценке надежности приборов отмечается важность испытаний на стойкость к воздействиям таких климатических факторов, как влажность и температура. Показано, что снижению изоляционных свойств материалов способствует повышенная влажность. Следовательно, отклонения в работе электрических приборов вызывают с ее длительным воздействием. По состоянию испытуемого изделия и данным, полученным от климатической камеры, можно сделать вывод о возможности использования изделия в заданных условиях и о качестве изделия. В зависимости от состояния испытуемой продукции, некоторые отказы могут ускоряться при отрицательных температурах, а другие — при положительных. Большинство современных камер разработаны таким образом, что диапазон воспроизводимых в них температур (включающий как отрицательные, так и положительные температуры) значительно больше необходимого для испытания конкретной продукции.

Одним из основных требований к применению испытательного оборудования для проверки надежности и работоспособности продукции является проведение процедуры его аттестации, являющейся важной частью Государственной системы обеспечения единства измерений. Программа и методика аттестации конкретного испытательного оборудования разрабатывается в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.568–2017 с учетом технических характеристик, прописанных в его эксплуатационной документации [6]. Согласно ГОСТ Р 8.568–2017, основная цель аттестации испытательного оборудования — подтверждение характеристик испытательного оборудования и возможности воспроизведения условий испытаний продукции или определенных

видов испытаний в заданных пределах с допустимыми отклонениями и установление пригодности использования испытательного оборудования в соответствии с его назначением [1].

В соответствии с данными, опубликованными в [7, 8], полнота и корректность проведения процедуры аттестации напрямую влияет на ее результат.

Аттестацию испытательного оборудования классифицируют на первичную, периодическую и повторную. При проведении первичной аттестации, необходимой при вводе в эксплуатацию испытательного оборудования для подтверждения его возможности воспроизводить условия испытаний в пределах допустимых отклонений, диапазон его определяемых характеристик устанавливается в соответствии с эксплуатационной документацией на испытательное оборудование и параметрами, необходимыми для испытаний конкретной продукции.

Периодическая аттестация испытательного оборудования — это аттестация, проводимая с целью подтверждения соответствия характеристик испытательного оборудования требованиям нормативных документов на методы испытаний продукции и эксплуатационной документации на испытательное оборудование и пригодности его к дальнейшему использованию.

Испытательное оборудование подвергается повторной аттестации в объеме первичной: при вводе в эксплуатацию после ремонта или модернизации; после внесения изменений в метрологически значимую часть программного обеспечения; при получении отрицательных результатов первичной аттестации (при этом согласно [1] допускается не проводить повторную аттестацию по пунктам программы и методики аттестации, имевших положительные результаты при первичной аттестации); при ухудшении качества выпускаемой продукции, вызванного несоответствием характеристик испытательного оборудования требуемым; по указанию представителей государственных надзорных органов.

Исходя из определений видов аттестации к проведению испытаний продукции, допускается только испытательное оборудование признанное годным по результатам проведенной первичной (периодической или повторной) аттестации. Из результатов испытаний, полученных на таком оборудовании, можно сделать вывод о качестве изделия и спрогнозировать срок службы изделия в естественной среде.

На сегодняшний день на отечественном рынке испытательного оборудования существует большое количество предложений не только по продаже и установке испытательного оборудования для нужд производства, но и по оказанию услуг по проведению испытаний какой-либо продукции в соответствии с заявленными требованиями заказчика. Несмотря на большое количество таких испытательных центров, многие производители предпочитают приобретать собственное испытательное оборудование.

Выбирая камеру для проведения испытания продукции, потребитель отталкивается от своих практических потребностей. Для принятия решения по приоритетному производителю достаточно тщательно изучить, из чего же состоят камеры и какими параметрами они обладают.

Долгое время предприятия предпочитали приобретать импортное испытательное оборудование, но с уходом из России официальных поставщиков европейского и американского испытательного

оборудования у отечественных предприятий больше нет возможности закупать европейское оборудование по ценам от поставщика. В связи с введенными санкциями европейское и американское испытательное оборудование теперь можно приобрести лишь ввезенное по параллельному импорту. При этом стоимость данного оборудования увеличивается из-за высокой стоимости валюты, а срок поставки значительно увеличивается. В таких условиях отечественные предприятия уделяют больше внимания отечественным производителям испытательного оборудования.

Уход с российского рынка европейских поставщиков открывает возможность отечественным производителям расширить не только ассортимент производимого испытательного оборудования по качеству, не уступающего зарубежным аналогам, но и получить возможность сервисного обслуживания в любое время и без всяких проблем [9, 10]. Кроме того, закупка испытательного оборудования будет более рентабельной, чем сотрудничество с партнерами из-за рубежа.

Освободившееся место на рынке испытательного оборудования дает возможности для развития не только российским производителям, но и азиатским компаниям. Выбирая испытательное оборудование, потребители зачастую находятся в плену стереотипов в отношении китайской продукции [11]. Несмотря на присутствующие стереотипы, многие китайские производители специализируются на производстве сравнительно недорогого, но качественного оборудования [12].

На сегодняшний день на российском рынке испытательного оборудования существует большое количество отечественных производителей. Для демонстрации новейшего оборудования и технологического тестирования выпускаемой продукции периодически проводятся выставки [13].

Информационный сбор и анализ данных, представленных в международных и российских базах научных разработок, с применением сравнительного метода технических решений, направленных на автоматизацию процесса испытаний радиоэлектронной продукции в климатических камерах, служит методической основой любого исследования.

Для проведения сравнительного анализа испытательного оборудования, отвечающего требованиям на данный период времени, были выбраны два отечественных и два зарубежных производителя:

— ООО «ОРИОНТЕРМ», ООО «МИР ОБОРУДОВАНИЯ» — отечественные производители испытательного оборудования;

— «JSR» — корейский производитель испытательного оборудования;

— «SONACME» — китайский производитель испытательного оборудования.

Ниже приведен аналитический обзор климатических камер отечественных и зарубежных производителей (табл. 1, 2) [14–17].

Устройством климатической камеры для испытаний радиопродукции на устойчивость к воздействию внешних факторов состоит в следующем. Внешний каркас отечественных климатических камер изготовлен из сварного профиля, обеспечивающего заданную жесткость конструкции, съемные стальные панели предотвращают несанкционированную регулировку камеры; рабочая камера изготовлена из коррозионной нержавеющей стали. На стенках камеры укреплен слой теплоизоляции из минеральной ваты.

**Таблица 1. Технические и функциональные характеристики тепло-влаги камер отечественных производителей**  
**Table 1. Technical and functional features of heat and moisture chambers of domestic companies**

Производитель тепло-влаги камеры	Модель	Объем рабочей камеры, л	Диапазон воспроизводимой температуры, °С	Неравномерность температуры по объему рабочей камеры, не более, °С	Диапазон поддержания относительной влажности, %	Точность поддержания влажности, %
ОРИОНТЕРМ	КТВ-60	60	от 5 до 100	±2	от 40 до 95	±5
	КТВ-120	120				
	КТВ-250	250				
	КТВ-500	500				
	КТВ-1000	1000				
	КТВ-2000	2000				
МИР ОБОРУДОВАНИЯ	Climcontrol M 0/100-80 КТВ	80	от 0 до 90	±3	от 20 до 98	3–5
	Climcontrol M 0/100-120 КТВ	120				
	Climcontrol M 0/100-250 КТВ	250				
	Climcontrol M 0/100-500 КТВ	500				
	Climcontrol M 0/100-1000 КТВ	1000				
	Climcontrol M 0/100-1500 КТВ	1500				
	Climcontrol M 0/100-2000 КТВ	2000				
	Climcontrol M 0/100-3000 КТВ	3000				
	Climcontrol M 0/100-4000 КТВ	4000				

**Таблица 2. Технические и функциональные характеристики тепло-влаги камер зарубежных производителей**  
**Table 2. Technical and functional features of heat and moisture chambers of foreign companies**

Производитель тепло-влаги камеры	Модель	Объем рабочей камеры, л	Диапазон воспроизводимой температуры, °С	Неравномерность температуры по объему рабочей камеры, не более, °С	Диапазон поддержания относительной влажности, %	Точность поддержания влажности, %
JSR	JSRH-150CP	150	от –20 до 150	± 0,7	от 35 до 98	± 0,4 (при относительной влажности 60 %)
	JSRH-250CP	252				
	JSRH-500CP	448				
	JSRH-800CP	800				
SONACME	СТ/64/70(Н)	64	от –70 до 100	±1,5	от 10 до 98	—
	СТ/180/70(Н)	180				
	СТ/340/70(Н)	340				
	СТ/600/70(Н)	600				
	СТ/1000/70(Н)	1000				

Элементы управления камерой представлены на русском языке и расположены на передней панели. Камеры, оснащенные монитором, фиксирующим температуру и время процесса, подключенные при необходимости к компьютеру для регистрации процесса испытаний, позволяют осуществлять работу в двух режимах: «По уставке» и «По программе» [14–15].

Режим работы «По программе» используется в том случае, если требуется задать несколько температурных точек и время выдержки в климатической камере.

Отличительными особенностями камер тепло-влаги ООО «ОРИОНТЕРМ» являются:

- удобная и информативная панель управления камеры тепло-влаги;
- дополнительные элементы защиты холодильного отсека;
- удобное расположение бака для дистиллированной воды.

Отличительными особенностями тепло-влаги камер ООО «МИР ОБОРУДОВАНИЯ» являются:

- высокая продолжительность непрерывной работы;
- низкая средняя потребляемая электрическая мощность;
- пониженный уровень шума;
- наличие защиты от перегрева и работы в сверхперегруженном режиме.

Например, камеры Climcontrol при работе на положительных температурах выключаются, если в процессе работы температура в камере превышает установленное значение на 10 °С и может быть включена только принудительно, теплоизоляция камеры предотвращает нагрев наружных поверхностей камеры до опасных температур.

Стоит отметить, что тепло-влаги камер отечественных производителей имеют больший объем рабочей зоны камеры по сравнению с импортными. Также отечественные предприятия оказывают

услуги по дополнительной установке пользовательских датчиков для более подробного исследования испытываемой продукции. Кроме камер стандартного объема отечественные производители оказывают услуги по производству нестандартных камер, а также по ремонту и модернизации своей продукции. Заявленная предположительность службы камер не менее 10 лет. Срок поставки отечественных камер составляет от 1 до 40 дней в зависимости от удаленности.

### Основные выводы

Для исследования радиопроductии на устойчивость к воздействию климатических условий необходимо использовать испытательное оборудование, имитирующее условия, близкие к условиям эксплуатации данной продукции, а именно тепло-влажность камеры. Но в связи с уходом с российского рынка западных поставщиков отечественные предприятия уделяют все больше внимания отечественным производителям испытательного оборудования.

В результате аналитического обзора было установлено, тепло-влажность камеры, представленные на российском рынке, имеют широкий функционал, позволяющий воспроизводить многофакторные условия проведения испытаний продукции.

Установлено, что тепло-влажность камеры отечественного производства ООО «ОРИОНТЕРМ» и ООО «МИР ОБОРУДОВАНИЯ» обладают высокой степенью автоматизации процессов регулирования климатических условий, не уступающих по качеству зарубежным. Все рассмотренные тепло-влажность камеры имеют высокий уровень безопасности. Например, камеры Climcontrol при работе на положительных температурах выключаются, если в процессе работы температура в камере превышает установленное значение на 10 °С, и могут быть включены только принудительно, а теплоизоляция камеры предотвращает нагрев наружных поверхностей камеры до опасных температур.

### Список источников / References

1. ГОСТ Р 8.568–2017. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. Введ. 01–08–2018. Москва: Стандартинформ, 2018. 16 с.

GOST R 8.568–2017. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy (GSI). Attestatsiya ispyatel'nogo oborudovaniya. Osnovnyye polozheniya [State system for ensuring the uniformity of measurements. Verification of testing equipment. General provisions]. Moscow, 2018. 16 p. (In Russ.).

2. Семенова Н. А., Гришин А. А., Дорохов А. А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // Вестник НГИЭИ. 2020. № 1 (104). С. 5–14. EDN: DWMJSZ.

Semenova N. A., Grishin A. A., Dorokhov A. A. Analiticheskiy obzor klimaticheskikh kamer dlya vyrashchivaniya ovoshchnykh kul'tur [Analytical review of climatic chambers for vegetable crops growing]. Vestnik NGIEI. Bulletin NGIEI. 2020. No. 1 (104). P. 5–14. EDN: DWMJSZ. (In Russ.).

3. ГОСТ 30630.2.1–2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры. Введ. 01–01–2015. Москва: Стандартинформ, 2014. 32 с.

GOST 30630.2.1–2013. Metody ispytaniy na stoykost' k klimaticheskim vneshnim vozdeystviyushchim faktoram mashin, priborov i drugikh tekhnicheskikh izdeliy. Ispytaniya na

ustoychivost' k vozdeystviyu temperatury [Climatic environment endurance test methods for machines, instruments and other industrial products. Test for stability influence of temperature]. Moscow, 2014. 32 p. (In Russ.).

4. Штыкина Д. М., Грибов В. В. Анализ характеристик оборудования для климатических испытаний // Молодой ученый. 2016. № 12-3 (116). С. 71–74. EDN: WDEOUV.

Shtykhina D. M., Gribov V. V. Analiz kharakteristik oborudovaniya dlya klimaticheskikh ispytaniy [Analysis of equipment features for climatic tests]. Molodoy uchenyy. Young Scientist. 2016. No. 12-3 (116). P. 71–74. EDN: WDEOUV. (In Russ.).

5. Подсякин А. С., Андреев П. Г., Мазанов А. М., Вершинин А. Е. [и др.] Климатические и биологические факторы, влияющие на элементы конструкции и параметры РЭС // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. С. 243–244. EDN: YAFGJV.

Podsyakin A. S., Andreyev P. G., Mazanov A. M., Verшинin A. E. [et al.]. Klimaticheskiye i biologicheskiye faktory, vliyayushchiye na elementy konstruksii i parametry RES [Climatic and biological factors affecting the structural elements and parameters of thermal power plants]. Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality». 2018. P. 243–244. EDN: YAFGJV. (In Russ.).

6. Давыдов В., Глуханов А. Анализ методик поверки и аттестации измерительного и испытательного оборудования организации // Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: тр. II Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 323–330. EDN: DCHDFS.

Davydov V., Glukhanov A. Analiz metodik poverki i attestatsii izmeritel'nogo i ispyatel'nogo oborudovaniya organizatsii [Analysis of methods of inspection and certification of measuring organization test equipment]. Rol' tekhnicheskogo regulirovaniya i standartizatsii v epokhu tsifrovoy ekonomiki. Role of Technical Regulation and Standardization in the Era of the Digital Economy. 2020. P. 323–330. EDN: DCHDFS. (In Russ.).

7. Кутяйкин В. Г. Технические средства для измерений, испытаний и контроля: терминология // Компетентность. 2019. № 7. С. 37. EDN: PWEXQX.

Kutyaykin V. G. Tekhnicheskiye sredstva dlya izmereniy, ispytaniy i kontrolya: terminologiya [Technical means for measurement, testing and control. Terminology]. Kompetentnost'. Competence. 2019. No. 7. P. 37. EDN: PWEXQX. (In Russ.).

8. Turgunbaev A., Usmanova H., A. Fakhry Kamel Mohamad, Abdurakhmanov O. Metrological certification and test conditions for verification equipment. Technical Science and Innovation. 2020. Issue 4. P. 129–133. DOI: 10.51346/tstu-01.20.4-77-0094.

9. Крылова А. Е., Лаврентьева О. А. «Аналитика Экспо-2023»: праздник на улице российского производителя // Аналитика. 2023. Т. 13, № 3. С. 166–178. EDN: MVRKSQ.

Krylova A. E., Lavrent'yeva O. A. «Analitika Ekspo-2023»: prazdnik na ulitse rossiyskogo proizvoditelya [«Analytics Expo 2023»: a celebration on the street of the Russian manufacturer. Analitika. Analytics. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 166–178. EDN: MVRKSQ. (In Russ.).

10. Молчанов С., Сигалова Л. Климатические испытательные камеры на страже качества новой продукции // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 6 (66). С. 64–65. EDN: RQANDF.

Molchanov S., Sigalova L. Klimaticheskiye ispyatel'nyye kamery na strazhe kachestva novoy produktsii [Climatic test chambers protecting the quality of new products]. Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti. Technologies in the Electronic Industry. 2013. No. 6. P. 64–65. EDN: RQANDF. (In Russ.).

11. Выбор климатической камеры: финансы и нюансы. URL: <https://industry-hunter.com/baza-znaniy/vybor-klimaticheskoy-kamery-finansy-i-nuansy> (дата обращения: 11.12.2024).

Vybor klimaticheskoy kamery: finansi i nyuansy [Choosing a climate chamber: finances and nuances]. URL: <https://industryhunter.com/baza-znaniy/vybor-klimaticheskoy-kamery-finansi-i-nyuansy> (accessed: 11.12.2024). (In Russ.).

12. Кисин А. Атака Поднебесной на российский рынок испытательного оборудования // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2008. № 8. С. 44–45.

Kisin A. Ataka Podnebesnoy na rossiyskiy gupok ispytatel'nogo oborudovaniya [Attack of the Celestial Empire on the Russian market of testing equipment]. *Proizvodstvo Elektroniki: Tekhnologii, Oborudovaniye, Materialy*. 2008. No. 8. P. 44–45. (In Russ.).

13. Testing&Control 2022: испытательное и контрольно-измерительное оборудование для всех ключевых отраслей отечественной промышленности. Вестник промышленности. 2022. 19 октября.

Testing&Control 2022: ispytatel'noye i kontrol'no-izmeritel'noye oborudovaniye dlya vseh klyuchevykh otrasley otechestvennoy promyshlennosti [Testing&Control 2022: experimental measuring equipment for all key sectors of the economy]. *Vestnik Promyshlennosti*. 2022. October 19. (In Russ.).

14. Климатические камеры серии Тепло-Влага // Орион-терм. URL: <https://orionterm.ru/product-category/klimaticheskije-kamery-serii-teplo-vlaga/> (дата обращения: 01.12.2024).

Klimaticheskije kamery serii Teplo-Vlaga [Climatic chamber Heat-Moisture]. *Orionterm*. URL: <https://orionterm.ru/product-category/klimaticheskije-kamery-serii-teplo-vlaga/> (accessed: 01.12.2024). (In Russ.).

15. Климатические камеры Тепло-Влага // Мир оборудования. URL: [https://mirobordovaniya.ru/catalog/klimaticheskije\\_kamery/klimaticheskije\\_kamery\\_teplo-vlaga/](https://mirobordovaniya.ru/catalog/klimaticheskije_kamery/klimaticheskije_kamery_teplo-vlaga/) (дата обращения: 01.12.2024).

Klimaticheskije kamery Teplo-Vlaga [Climatic chamber Heat-Moisture]. *Mir oborudovaniya*. URL: [https://mirobordovaniya.ru/catalog/klimaticheskije\\_kamery/klimaticheskije\\_kamery\\_teplo-vlaga/](https://mirobordovaniya.ru/catalog/klimaticheskije_kamery/klimaticheskije_kamery_teplo-vlaga/) (accessed: 01.12.2024). (In Russ.).

16. Temperature Humidity Testing. *SONACME*. URL: <https://sonacme.com/products/179.html> (accessed: 01.12.2024).

17. Лабораторное климатическое оборудование JSR. URL: <https://www.moslabo.ru/production/labobispytat/klimkameryobor/jsr/> (дата обращения: 01.12.2024).

Laboratornoye klimaticheskoye oborudovaniye JSR [JSR laboratory climate control equipment]. URL: <https://www.moslabo.ru/production/labobispytat/klimkameryobor/jsr/> (accessed: 01.12.2024). (In Russ.).

---

**ЕГОРОВА Анна Андреевна**, аспирант кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; инженер по метрологии

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», г. Омск.

SPIN-код: 2094-5190

AuthorID (РИНЦ): 1267107

ORCID: 0009-0002-2869-1846

Адрес для переписки: [aa.egorova1609@omgau.org](mailto:aa.egorova1609@omgau.org)

**ВАРЕПО Лариса Григорьевна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4980-6679

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

Адрес для переписки: [larisavarepo@yandex.ru](mailto:larisavarepo@yandex.ru)

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

Статья поступила в редакцию 18.02.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2025; принята к публикации 06.05.2025.

**EGOROVA Anna Andreevna**, Postgraduate of the Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk; Metrology Engineer, Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering (JSC ONIP), Omsk.

SPIN-code: 2094-5190

AuthorID (RSCI): 1267107

ORCID: 0009-0002-2869-1846

Correspondence address: [aa.egorova1609@omgau.org](mailto:aa.egorova1609@omgau.org)

**VAREPO Larisa Grigorievna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4980-6679

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

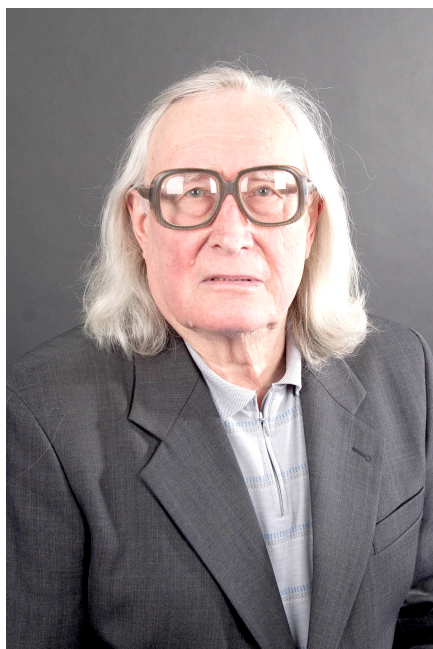
ResearcherID: B-1163-2015

Correspondence address: [larisavarepo@yandex.ru](mailto:larisavarepo@yandex.ru)

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

The article was submitted 18.02.2025; approved after reviewing 10.04.2025; accepted for publication 06.05.2025.

## ВИКТОРУ ИЛЬИЧУ ПОТАПОВУ — 90 ЛЕТ



8 июля 2025 года исполняется 90 лет выдающемуся отечественному учёному, одному из пионеров в области информатики и вычислительной техники, доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Российской Федерации, заслуженному профессору Омского государственного технического университета, действительному члену Международной академии наук высшей школы и Международной академии информатизации — **Виктору Ильичу Потапову**.

Родился Виктор Ильич в 1935 году в городе Омске — городе, с которым связана вся его жизнь, научная и педагогическая деятельность. Высшее образование он получил в Томском государственном университете, окончив в 1960 году радиофизический факультет по специальности «Радиофизика и электроника». Уже в годы учёбы проявил глубокий интерес к проблемам надёжности технических систем и математическим методам их анализа. Впоследствии эта область стала фундаментом всей его научной карьеры.

С 1961 по 1965 годы В. И. Потапов работал инженером в специализированном конструкторском бюро предприятия п/я № 2 Министерства радиопромышленности СССР, принимал участие в разработке вычислительных средств управления для подвижных объектов и сложных технологических процессов. Эти годы стали важнейшим этапом профессионального становления — практика в реальных производственных условиях дополнила фундаментальную подготовку и дала мощный импульс для будущих научных достижений.

В 1965 году он поступил в очную аспирантуру Московского авиационного института имени С. Орджоникидзе на факультет «Системы управления летательных аппаратов». После успешной защиты кандидатской диссертации в 1969 году Виктор

Ильич начинает преподавательскую и научную деятельность в Омском государственном техническом университете (в то время — Омском политехническом институте), с которым его связывает более полувека плодотворной работы.

Уже в 1972 году он возглавляет созданную им кафедру «Электронные вычислительные машины», где впервые в Омске началась подготовка специалистов в области вычислительной техники. Под его руководством кафедра становится одним из научных и методических центров в Сибири, реализующим новейшие направления подготовки, — от схемотехники и архитектуры ЭВМ до искусственного интеллекта.

В 1975 году В. И. Потапов защищает докторскую диссертацию, а в 1977-м ему присваивается звание профессора. В те годы он активно работает над формированием комплексной инфраструктуры научных исследований в ОмГТУ: создается общепрофессиональный вычислительный центр; отраслевая научно-исследовательская лаборатория «Автоматизация проектирования АСУ»; научный центр «Информатика», курирующий региональные программы информатизации.

С 1978 по 1985 годы Виктор Ильич занимает должность проректора по научной работе Омского политеха. Именно в этот период им и его командой разрабатывается и внедряется система учебно-научно-производственных комплексов, обеспечивающая эффективную интеграцию научных исследований и образовательного процесса. Система становится эталоном для других технических вузов страны, получает серебряную медаль ВДНХ (1982) и диплом I степени Минвуза РСФСР (1983). В те же годы ОмГТУ входит в число ведущих вузов страны по показателям научной продуктивности.

Под научным руководством В. И. Потапова выполнены и реализованы масштабные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в рамках программ Минвуза СССР, ГКНТ, отраслевых министерств и, позднее, Министерства образования и науки РФ. Он возглавлял фундаментальные исследования по направлениям: схемотехника пороговой логики, таблично-алгоритмические методы вычислений, оптимизация резервированных систем, надёжность нейросетей, моделирование конфликтных ситуаций в технических системах.

Виктор Ильич внёс значительный вклад в развитие теории и практики цифровой схемотехники. Разработанные им технологии диагностики многофункциональных элементов с кодовой перестройкой логики на пороговом базисе, решения на основе цилиндрических магнитных доменов были внедрены в специализированных вычислительных устройствах. По этим направлениям защищены 32 авторских свидетельства и опубликована монография «Схемотехника и контроль элементов пороговой логики».

Не менее значимыми стали его работы в области таблично-алгоритмических вычислений, где им были созданы оригинальные структуры и алгорит-

мы воспроизведения функций. Результаты опубликованы в виде монографии, статей и 14 изобретений.

Огромное внимание В. И. Потапов уделял вопросам надёжности сложных систем. Им сформулированы и решены принципиально новые задачи резервирования с учётом изменяющейся во времени интенсивности отказов. Он первым применил методы оптимального управления и теорию игр к техническим системам, что нашло отражение в монографии «Новые задачи оптимизации резервированных систем».

В последние два десятилетия научный интерес профессора Потапова сосредоточен на надёжности и диагностике искусственных нейронных сетей. Им заложены основы новой научной области — прикладной теории надёжности нейросетей. Им опубликовано свыше 50 статей, 5 фундаментальных монографий, включая «Основы технической диагностики искусственных нейронов и нейронных сетей» и «Модели для решения задач надёжности искусственных нейронных систем».

Значительное внимание уделяется также проблемам противоборства технических систем. Под его руководством созданы математические модели и алгоритмы анализа конфликтных ситуаций между динамическими объектами. По этой теме опубликованы десятки работ и монографии.

Всего за годы научной и методической деятельности В. И. Потапов опубликовал более **750** научных трудов, в том числе **11** монографий, **25** учебных пособий; зарегистрировал более **50** программ для ЭВМ; получил **165** авторских свидетельств и патентов, из которых многие были внедрены на практике. Под его редакцией издаются сборники научных трудов.

На протяжении всей своей карьеры Виктор Ильич активно занимается подготовкой научных кадров. Под его руководством защищены **22 кандидатские** и **10 докторских диссертаций**. Им создана одна из сильнейших научных школ в области вычислительной техники, широко известная в научном сообществе России и за её пределами.

Профессор В. И. Потапов продолжает читать лекции и вести занятия со студентами бакалаври-

ата и магистратуры, курирует образовательные программы по направлениям 09.03.01 и 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника». Среди читаемых им курсов — «Основы научных исследований», «Надёжность и отказоустойчивость вычислительных систем», «Защита интеллектуальной собственности в области информационных технологий» и другие.

Он ведёт большую общественную работу: был народным депутатом Омского областного Совета, возглавлял комиссию по науке и образованию, входил в состав координационных и диссертационных советов, руководил региональными научными объединениями и фондами.

За заслуги в науке и образовании он награждён знаком «Изобретатель СССР», знаком «Почётный радист СССР», медалью Губернатора Омской области «За высокие достижения», является Почётным членом Российского НТО РЭС имени А. С. Попова. В 1993 году Указом Президента Российской Федерации ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации», а в 2019 году решением Учёного совета ОмГТУ — звание «Заслуженный профессор ОмГТУ».

**В этот знаменательный день — 90-летний юбилей — коллеги, друзья, ученики, воспитанники, благодарные студенты, научная общественность и коллектив Омского государственного технического университета от всей души поздравляют Виктора Ильича Потапова!**

**Мы желаем Вам, уважаемый Виктор Ильич, крепкого здоровья, бодрости духа, радости научных открытий, признания и любви Ваших многочисленных учеников и последователей! Пусть Ваш путь в науке, наполненный достижениями и свершениями, продолжается новыми плодотворными проектами и гордостью за воспитанников!**

**МАКАРОВ Владимир Вячеславович,  
декан факультета  
«Информационные технологии  
и компьютерные системы» ОмГТУ**

## 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