

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

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

2025 № 4 (196)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 4 (196) 2025

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

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

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

Подписной индекс
в каталоге Роспечать 83597

Ответственный секретарь
М. Ф. Федорчук

Редактор
Т. П. Семина

Компьютерная верстка
О. Н. Чирун

Макет обложки
В. С. Гуринов

© Редакция журнала
«Омский научный вестник», ОмГТУ

Подписано в печать 21.11.2025 г.
Дата выхода в свет 28.11.2025 г.

Формат 60x84 1/8.
10,70 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 84
Цена свободная

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СУШКОВ Валерий Валентинович, д. т. н., профессор,
Нижегородский государственный университет, г. Нижегородск

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



OMSK SCIENTIFIC BULLETIN

Published Since October 1997.
Published 4 times a year

№ 4 (196) 2025

FOUNDER

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

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

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

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

Journal Page on Founder's Website:
[http://www.omgtu.ru/
general_information/media_omgtu/
journal_of_oms_k_research_journal/](http://www.omgtu.ru/general_information/media_omgtu/journal_of_oms_k_research_journal/)

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

Executive Secretary
M. F. Fedorchuk

Editor
T. P. Semina

Computer Page-Proofs
O. N. Chirun

Cover Layout
V. S. Gurinov

© Editorial Board of
«Omsk Scientific Bulletin»,
OmSTU

Signed in Print 21.11.2025
Date of Publication 28.11.2025

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 10,70
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 84
Open Price

EDITORIAL BOARD

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова, Е. В. Любчинов. Конструирование РН-кривой пространства по ортогональным проекциям её годографа	5
В. Ю. Юрков, М. А. Чижик, И. А. Шевелёва. Структурная геометрическая модель ассоциированных множеств кривых	12
А. Х. Шамутдинов, И. Ю. Лесняк. Методика расчёта кинематики штока двигателя поступательного движения рычажного манипулятора, движущегося в прямолинейной направляющей	18
Ю. Д. Маркина. Влияние расположения технологического оборудования на результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи	26
М. О. Шальнев, Я. В. Денисова. Применение цифровых инструментов в области бережливого производства на промышленных предприятиях	35
А. Б. Яров, А. В. Толок, А. Е. Панкова, А. Е. Ченцов. Функционально-воксельный метод для геометрического описания зоны обнаружения радиолокационной станции	43
Н. Д. Прокопенко, М. С. Морозова, М. Ю. Чубуков. Опыт применения инструментов бережливого производства для снижения затрат на химическую обработку труб	51

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Д. В. Половинка, Ю. В. Рублёва, М. Н. Ивлев. Система контроля влагосодержания трансформаторного масла по измеренной добротности	58
Ю. Н. Смыков, С. В. Горелов. Процессы формирования и подавления детерминированных провалов напряжения в автономных системах электроснабжения	65
Б. Д. Табаров. Оценка расширения функциональных возможностей реакторно-тиристорного регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах	73

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

В. А. Дышлевский, И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, В. А. Рольгейзер. Методы теории принятия решений как способ повышения достоверности оценки состояния технических систем	82
--	----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

K. L. Panchuk, T. M. Myasoedova, E. V. Lyubchinov. Construction of a PH-curve of space by orthogonal projections of its hodograph	5
V. Yu. Yurkov, M. A. Chizhik, I. A. Sheveleva. Structural geometric model of associated sets of curves	12
A. Kh. Shamutdinov, I. Yu. Lesnyak. Methodology for calculating the kinematics of the piston rod of a translational motion engine of a lever manipulator moving in a rectilinear guide	18
Yu. D. Markina. Impact of the location of technological equipment on the calculation results of the digital cell tower	26
M. O. Shalnev, Ya. V. Denisova. Application of digital tools in the sphere of lean production at industrial enterprises	35
A. B. Yarov, A. V. Tolok, A. E. Pankova, A. E. Chentsov. Functional-voxel method for geometric description of a radar detection zone	43
N. D. Prokopenko, M. S. Morozova, M. Yu. Chubukov. Expertise in applying lean manufacturing tools to reduce costs of the pipe chemical processing	51

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

D. V. Polovinka, Yu. V. Rubleva, M. N. Ivlev. Moisture content control system for transformer oil using measured Q-factor	58
Yu. N. Smykov, S. V. Gorelov. Processes of formation and suppression of deterministic voltage failures in autonomous power supply systems	65
B. D. Tabarov. Evaluation of the expansion of the functionality of a reactor-thyristor voltage regulator with wide voltage regulation ranges	73

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND CONNECTION

V. A. Dyshlevskiy, I. S. Kudryavtseva, A. P. Naumenko, V. A. Rol'geyzer. Methods of decision theory as a way to increase the reliability of assessment of the technical systems state	82
--	----

КОНСТРУИРОВАНИЕ PH-КРИВОЙ ПРОСТРАНСТВА ПО ОРТОГОНАЛЬНЫМ ПРОЕКЦИЯМ ЕЁ ГОДОГРАФА

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

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В современном геометрическом моделировании известен класс плоских и пространственных PH-кривых (кривых пифагорова годографа), получивших теоретическое обоснование математиком Rida T. Farouki в 2007 г. PH-кривые обладают уникальным свойством, имеющим важное значение в решении множества разноплановых практических задач, а именно «параметрическая скорость» этих кривых, т. е. производная от длины дуги по параметру кривой является полиномиальной (или рациональной) функцией параметра. Данное свойство обусловлено тем, что координатные компоненты годографа PH-кривой представляют собой элементы пифагорова $(n+1)$ -кортежа координатных полиномов.

Благодаря отмеченному свойству PH-кривые востребованы в решениях различных практических задач: генерация траекторий беспилотных летательных аппаратов, оптимизация пути мобильных роботов, расчёт оптимальных по форме и по длине сегментов оси автомобильной дороги и др. В теории пространственных PH-кривых разработаны алгоритмы их аналитического конструирования. В указанном исследовании предложен подход к конструированию этих кривых, основанный на теории плоских PH-кривых и реализуемый последовательным конструированием образов — проекций пространственных PH-кривых на двух координатных плоскостях. Решение пространственной задачи конструирования сводится к решению двух задач последовательного конструирования на координатных плоскостях.

Приведены числовые примеры, демонстрирующие работоспособность предлагаемого подхода. При этом алгоритмы вычислений более просты, чем в случае известного пространственного аналитического подхода. В направлении развития предложенного подхода приведены числовые примеры конструирования пространственной составной PH-кривой по гладкости $C1$.

Ключевые слова: PH-кривые, пифагоровы годографы, полиномы, ортогональная проекция, составная кривая, гладкость стыковки.

Для цитирования: Панчук К. Л., Мясоедова Т. М., Любчинов Е. В. Конструирование PH-кривой пространства по ортогональным проекциям её годографа // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 5—11. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-5-11. EDN: WRXPUZ.



© Панчук К. Л., Мясоедова Т. М., Любчинов Е. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

CONSTRUCTION OF A PH-CURVE OF SPACE BY ORTHOGONAL PROJECTIONS OF ITS HODOGRAPH

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

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

In modern geometric modeling, a class of plane and spatial PH-curves (pythagorean hodograph curves) is known, which were theoretically substantiated by mathematician Rida T. Farouki in 2007. PH-curves have a unique property that is important in solving many different practical problems, namely: the "parametric speed" of these curves, i.e. the derivative of the arc length with respect to the curve parameter, is a polynomial (or rational) function of the parameter. This property is due to the fact that the coordinate components of the hodograph of the PH-curve are elements of the Pythagorean $(n+1)$ -tuple of coordinate polynomials.

Due to this property, PH-curves are in demand in solving various practical problems: generating trajectories for UAVs (unmanned aerial vehicles), optimizing the path of mobile robots, calculating segments of the axis of a road that are optimal in shape and length, etc. etc. In the theory of spatial PH-curves, algorithms for their analytical construction have been developed. In this paper, an approach to constructing these curves is proposed, based on the theory of plane PH-curves and implemented by sequentially constructing images-projections of spatial PH-curves on two coordinate planes. That is, solving the spatial construction problem is reduced to solving two problems of sequential construction on coordinate planes.

Numerical examples are given that demonstrate the efficiency of the proposed approach. At the same time, the calculation algorithms are simpler than in the case of the known spatial analytical approach. In the direction of developing the proposed approach, numerical examples of constructing a spatial composite PH-curve by smoothness C1 are given.

Keywords: PH-curves, pythagorean hodographs, polynomials, orthogonal projection, composite curve, smoothness of connection.

For citation: Panchuk K. L., Myasoedova T. M., Lyubchinov E. V. Construction of a PH-curve of space by orthogonal projections of its hodograph. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 5–11. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-5-11. EDN: WRXPUZ.



© Panchuk K. L., Myasoedova T. M., Lyubchinov E. V., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Кривые пифагорова годографа (РН-кривые) характеризуются особым свойством, заключающимся в том, что их «параметрическая скорость» — производная длины дуги по параметру кривой — является полиномиальной (или рациональной) функцией параметра [1–3]. Эта отличительная особенность, возникающая при априорном построении компонентов годографа полиномиальных или рациональных кривых в евклидовом пространстве, как элементов пифагоровых кортежей полиномов, придаёт РН-кривым множество полезных с вычислительной точки зрения свойств. Например, вычисление их длин дуг [4], расчёт оптимальной траектории путём минимизации функционала энергии кривизны [5, 6], конструирование эквидистантных (параллельных) кривых [1, с. 389] — решение этих и множества других практических задач выполняется точным способом, т. е. без применения приближенных вычислений.

Обширные практические применения РН-кривых представлены в работе [7]. Отметим дополнительно ещё несколько практических областей, в которых применение РН-кривых востребовано благодаря их уникальным полезным свойствам: генерация траекторий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [8–11], проектирование формы манипуляторов и планирование пути мобильных роботов [12, 13].

Теоретические основания РН-кривых наиболее полно и глубоко изложены в работе Rida T. Farouki [1, с. 369–680], одного из основных теоретиков-разработчиков этого класса кривых. В теории РН-кривых различают две их разновидности: плоские и пространственные РН-кривые.

Для понимания сути, новизны и полезности представленных в настоящей работе авторских результатов исследований в области РН-кривых приведём основные теоретические сведения, касающиеся этих кривых. На наш взгляд, это необходимо, поскольку основные публикации по теории и практическим применениям РН-кривых — это зарубежные публикации. В отечественных публикациях содержится крайне скудная информация об этом классе кривых.

Основные положения теории плоской РН-кривой

1. Пусть $\bar{r}: [t_0, t_n] \rightarrow \mathbb{R}^2$ — плоская регулярная полиномиальная кривая, при этом $\bar{r}(t) = \{x(t), y(t)\}$, где проекции кривой представляет собой полиномы порядка $\leq n$:

$$x(t) = \sum_{k=0}^n a_k \cdot t^k, \quad y(t) = \sum_{k=0}^n b_k \cdot t^k, \quad t \in [t_0, t_n].$$

Годограф регулярной кривой $\bar{r}(t)$ представляет собой векторное поле, построенное по множеству касательных векторов в точках кривой.

$$\bar{r}'(t) = \frac{d\bar{r}}{dt} = \{x'(t), y'(t)\}, \quad \bar{r}'(t) \neq 0.$$

2. Кривая $\bar{r}(t)$ будет РН-кривой, если существует полином $\sigma(t)$ такой, что

$$x'^2(t) + y'^2(t) = \sigma^2(t). \quad (1)$$

В этой связи для РН-кривой можно записать

$$\sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)} = \sigma(t). \quad (2)$$

3. Длина дуги РН-кривой вычисляется точно, т. е. без квадратурных правил:

$$s = \int_a^b |\bar{r}'(t)| \cdot dt = \int_a^b \sigma(t) \cdot dt. \quad (3)$$

4. Теорема о пифагоровом условии для плоскости [1, с. 382]. Пифагорово условие

$$a^2(t) + b^2(t) = c^2(t) \quad (4)$$

удовлетворяется полиномами $a(t)$, $b(t)$ и $c(t)$, если и только если существуют полиномы $u(t)$, $v(t)$ и $w(t)$ такие, что

$$\begin{aligned} a(t) &= w(t) \cdot (u^2(t) - v^2(t)), \\ b(t) &= 2w(t) \cdot u(t) \cdot v(t), \\ c(t) &= w(t) \cdot (u^2(t) + v^2(t)). \end{aligned} \quad (5)$$

Из теоремы следует, что годограф плоской РН-кривой может быть выражен в виде:

$$\begin{aligned}x'(t) &= w(t) \cdot (u^2(t) - v^2(t)), \\y'(t) &= 2w(t) \cdot u(t) \cdot v(t), \\ \sigma(t) &= w(t) \cdot (u^2(t) + v^2(t)).\end{aligned}\quad (6)$$

Полагаем, что в (5), а следовательно, и в (6), полиномы $u(t)$ и $v(t)$ действительные взаимно простые, т. е. НОД $(u(t), v(t)) = \text{const}$. Из всех возможных случаев рассматриваются те, в которых полиномы $u(t)$, $v(t)$ и $w(t)$ — не нулевые и $u(t)$, $v(t)$ одновременно не представляют собой const .

5. Плоская РН-кривая $\bar{r}(t) = \{x(t), y(t)\}$ может быть получена [1, с. 405–422] на основе комплексного полинома $\delta(t) = u(t) + iv(t)$ отождествлением $x'(t)$ и $y'(t)$ с действительной и мнимой частью полинома

$$\bar{r}'(t) = \delta^2(t) = u^2(t) + i2u(t) \cdot v(t) - v^2(t),$$

$$\text{т. е. } x'(t) = u^2(t) - v^2(t), \quad y'(t) = 2u(t) \cdot v(t),$$

$$x'^2(t) + y'^2(t) = \sigma^2(t).$$

6. *Замечание.* Если $\lambda = \deg(w(t))$ и $\mu = \max(\deg u(t), \deg v(t))$, где $\deg$ — «порядок», то РН-кривая, полученная интегрированием годографа (6) имеет порядок $n = \lambda + 2\mu + 1$ [1, с. 383]. Обычно принимают $w(t) = 1$ и получают примитивный годограф. Если $\max \deg(u(t), v(t)) = m$, то плоская РН-кривая имеет нечётный порядок $n = 2m + 1$. Таким образом, для плоской РН-кривой в области вещественных чисел имеет место соответствие

$$x'^2(t) + y'^2(t) = \sigma^2(t) \Leftrightarrow \begin{cases} x'(t) = w(t) \cdot [u^2(t) - v^2(t)] \\ y'(t) = 2w(t) \cdot u(t) \cdot v(t), \\ \sigma(t) = w(t) \cdot [u^2(t) + v^2(t)] \end{cases} \quad (7)$$

Основные положения теории пространственной РН-кривой

1. Подобно теореме о пифагоровом условии для плоской РН-кривой, существует теорема о таком же условии для пространственной РН-кривой [1, с. 462]. На основании этой теоремы проекционные компоненты годографа пространственной РН-кривой в области вещественных чисел представляются следующим образом:

$$\begin{aligned}x'(t) &= u^2(t) + v^2(t) - p^2(t) - q^2(t), \\y'(t) &= 2[u(t) \cdot q(t) + v(t) \cdot p(t)], \\z'(t) &= 2[v(t) \cdot q(t) - u(t) \cdot p(t)], \\ \sigma(t) &= u^2(t) + v^2(t) + p^2(t) + q^2(t),\end{aligned}\quad (8)$$

где $\sigma(t) = \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t) + z'^2(t)}$, $u(t)$, $v(t)$, $p(t)$, $q(t)$ — действительные взаимно простые полиномы. Когда эти полиномы имеют порядок не более μ , то пространственная РН-кривая, получаемая интегрированием годографа (8), имеет нечётный порядок $n = 2\mu + 1$.

2. Длина дуги пространственной РН-кривой вычисляется точно, без квадратурных правил:

$$s = \int_a^b |\bar{r}'(t)| \cdot dt = \int_a^b \sigma(t) \cdot dt. \quad (9)$$

3. Пространственная РН-кривая может быть определена на основе кватернионного полинома [1, с. 469–483]:

$$\mathcal{A} = u(t) + v(t) \cdot i + p(t) \cdot j + q(t) \cdot k, \quad (10)$$

выраженного в кватернионном базисе $(1, i, j, k)$ через произведение

$$\bar{r}(t) = \mathcal{A}(t)i\mathcal{A}^*(t),$$

где $\mathcal{A}^*(t) = u(t) - v(t) \cdot i - p(t) \cdot j - q(t) \cdot k$ — сопряжённый к $\mathcal{A}(t)$ кватернион. Полученная в результате интегрирования пространственная РН-кривая $\bar{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$ удовлетворяет условию $x'^2(t) + y'^2(t) + z'^2(t) = \sigma^2(t)$, где полиномы $x'(t)$, $y'(t)$, $z'(t)$ и $\sigma(t)$ имеют вид (8).

Анализ указанных выше в виде ссылок публикаций по РН-кривым позволяет сделать вывод о том, что математический аппарат пространственных РН-кривых гораздо сложнее, чем в случае плоских РН-кривых. В работе [14] исследуется решение задачи построения на плоскостях проекций РН-образов заданной пространственной РН-кривой. Обстоятельное решение этой задачи, которую можно отнести к классу прямых задач конструктивной геометрии (построение образов заданных геометрических объектов евклидова пространства на плоскостях проекций), отсутствует. В этой связи возникает вопрос о возможности сведения решения задачи пространственного конструирования РН-кривой к последовательному решению двух задач конструирования на плоскостях проекций с опорой на математический аппарат плоских РН-кривых. Последовательное решение этих двух задач по существу представляет собой решение обратной задачи конструктивной геометрии (восстановление пространственного геометрического образа по двум его прообразам на плоскостях проекций). Примером решения обратной задачи конструктивной геометрии, применительно к кривым линиям, являются работы [15, 16], в которых дано математическое решение задачи конструирования пространственной кривой линии по её ортогональным проекциям.

Цель исследования — конструирование РН-кривой пространства по ортогональным проекциям её пифагорова годографа.

Ортогональные проекции пифагорова годографа пространственной регулярной кривой

Рассмотрим и докажем утверждение, позволяющее конструировать пространственную РН-кривую по её годографу, ортогональные проекции которого обладают пифагоровым свойством.

Утверждение. Пусть полиномиальная кривая $\bar{r}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$, $t \in [t_0, t_n]$, $\bar{r}'(t) \neq 0$ обладает годографом $q: \bar{r}'(t) = \{x'(t), y'(t), z'(t)\}$ и пусть g_{xy} и $g_{\sigma z}$ — ортогональные проекции этого годографа на плоскостях O_{xy} и $O_{\sigma z}$ (Q), при этом g_{xy} — линейная, а $g_{\sigma z}$ — круговая проекция годографа (рис. 1). Тогда, если проекции g_{xy} и $g_{\sigma z}$ обладают пифагоровым свойством

$$q_{xy}: x'^2(t) + y'^2(t) = \sigma^2(t), \quad q_{\sigma z}: \sigma^2(t) + z'^2(t) = \mu^2(t),$$

т. е. реализуются полиномами $x'(t)$, $y'(t)$, $z'(t)$ и $\sigma(t)$ только при требовании существования других полиномов $u(t)$, $v(t)$, $a(t)$, $b(t)$ таких, что выполнены условия:

$$1) \quad x'(t) = u^2(t) - v^2(t), \quad y'(t) = 2u(t) \cdot v(t),$$

$$\sigma(t) = u^2(t) + v^2(t),$$

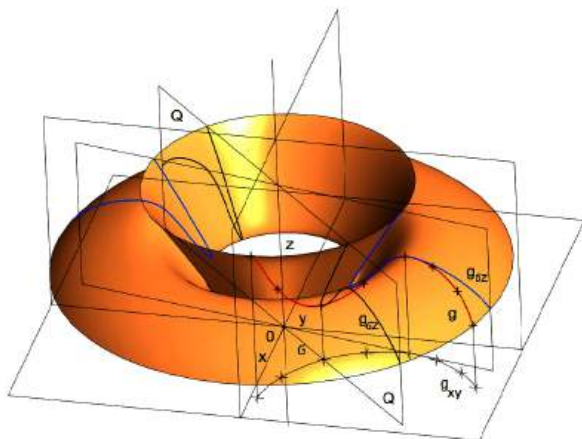


Рис. 1. Голограф g исходной кривой и его проекционные образы g_{xy} и g_{xz} в плоскостях проекций O_{xy} и O_{xz} соответственно
Fig. 1. Hodograph g of the original curve and its projection images g_{xy} and g_{xz} in the projection planes of O_{xy} and O_{xz} respectively

$$2) \sigma(t) = a^2(t) - b^2(t), \quad z'(t) = 2a(t) \cdot b(t),$$

$$\mu(t) = a^2(t) + b^2(t),$$

то кривая $\bar{r}(t)$ будет РН-кривой.

Геометрическое доказательство. Очевидно, условиями 1) и 2) последовательно формируются две пифагоровы тройки полиномов (рис. 2), приводящие к итоговому полиному $\mu(t)$. На основании определения РН-кривой [1]: полиномиальная кривая $\bar{r}(t) \in \mathbb{R}^n$ будет РН-кривой, если n координатных компонентов голографа $\bar{r}'(t)$ являются элементами пифагорова $(n+1)$ -кортежа полиномов, сумма квадратов которых совпадает с квадратом другого полинома $\mu(t)$. В соответствии с этим определением делаем вывод, что исходная кривая $\bar{r}(t)$ есть РН-кривая.

Алгебраическое доказательство. В соответствии с геометрическим доказательством имеют место быть две пифагоровы тройки из параметрических полиномов: первая — $x'^2(t) + y'^2(t) = \sigma^2(t)$, реализуемая при выполнении условий 1) и вторая — $\sigma^2(t) + z'^2(t) = \mu^2(t)$, реализуемая при выполнении условий 2). Исходя из первого уравнения второй тройки, вполне можно допустить, что

$$a(t) = \frac{\sigma(t) + k(t)}{2\sqrt{k(t)}}, \quad b(t) = \frac{\sigma(t) - k(t)}{2\sqrt{k(t)}}, \quad (11)$$

где $k(t) \neq 0$, представляет собой ненулевой полином, в частном случае — действительное число, не равное нулю. Покажем, что $x'^2(t) + y'^2(t) + z'^2(t) = \mu^2(t)$, в этом случае есть полный квадрат. Действительно, суммируя квадраты компонент голографа $\bar{r}'(t)$ с учётом того, что

$$x'(t) = u^2(t) - v^2(t), \quad y'(t) = 2u(t) \cdot v(t),$$

$$z'(t) = 2a(t) \cdot b(t) = 2 \frac{\sigma^2(t) - k^2(t)}{4k(t)}, \quad \sigma(t) = u^2(t) + v^2(t),$$

получаем полный квадрат

$$\mu^2(t) = \left[\frac{(u^2(t) + v^2(t))^2 + k^2(t)}{2k(t)} \right]^2. \quad (12)$$

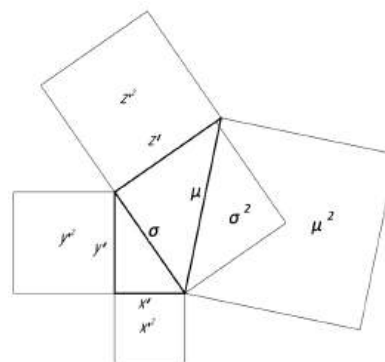


Рис. 2. Схема формирования полного квадрата полинома μ пифагоровыми тройками полиномов (x', y', σ) и (σ, z', μ)

Fig. 2. Formation scheme of the complete square of the μ polynomial by pythagorean triples of (x', y', σ) and (σ, z', μ) polynomials

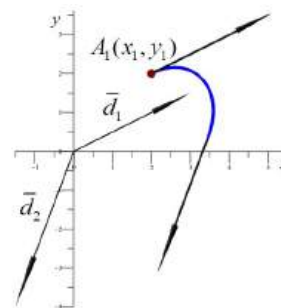


Рис. 3. Исходные данные
Fig. 3. Initial data

Результаты вычислительных экспериментов

Пример 1. Даны касательные вектора $\bar{d}_1(3;1,5)$ и $\bar{d}_2(-1,5;-4)$ в начальной $A(2,2)$ и конечной точках горизонтальной проекции искомой РН-кривой; $t_1 = 0,01$ и $t_2 = 1$ — граничные значения параметра t в этих точках (рис. 3). Требуется построить сегмент пространственной РН-кривой.

Алгоритм решения.

1. В соответствии с условиями задачи могут быть выбраны только параметрические полиномы первого порядка: $u = u_0t + u_1$, $v = v_0t + v_1$, $t \in [t_1, t_2]$. Находятся значения их коэффициентов u_0, v_0, u_1, v_1 на основе решения системы квадратичных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x'_1(t_1) &= u^2(t_1) - v^2(t_1) = (u_0t_1 + u_1)^2 - (v_0t_1 + v_1)^2, \\ y'_1(t_1) &= 2u(t_1) \cdot v(t_1) = 2(u_0t_1 + u_1)(v_0t_1 + v_1), \\ x'_2(t_2) &= u^2(t_2) - v^2(t_2) = (u_0t_2 + u_1)^2 - (v_0t_2 + v_1)^2, \\ y'_2(t_2) &= 2u(t_2) \cdot v(t_2) = 2(u_0t_2 + u_1)(v_0t_2 + v_1). \end{aligned} \right\}$$

Вводятся в уравнения системы заданные начальные и конечные значения параметра t и заданные значения проекций векторов $\bar{d}_1$ и $\bar{d}_2$, что приводит к следующей системе квадратичных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (0,01u_0 + u_1)^2 - (0,01v_0 + v_1)^2 &= 3, \\ 2(0,01u_0 + u_1)(0,01v_0 + v_1) &= 1,5, \\ (u_0 + u_1)^2 - (v_0 + v_1)^2 &= -1,5, \\ 2(u_0 + u_1)(v_0 + v_1) &= -4. \end{aligned} \right\}$$

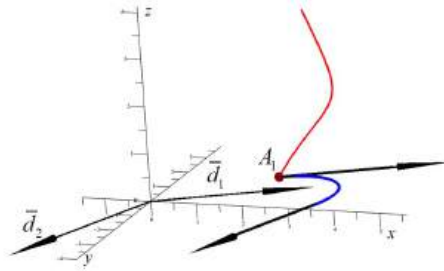


Рис. 4. Визуализация сегмента полученной РН-кривой

Fig. 4. Visualization of the segment of the obtained PH-curve

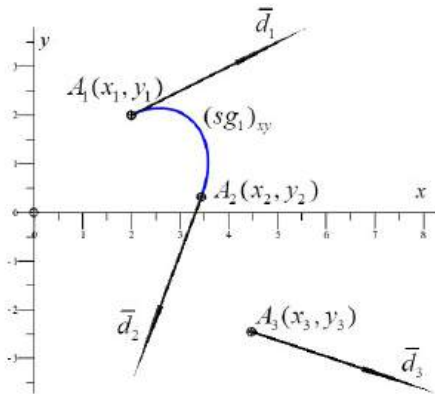


Рис. 5. Исходные данные для построения сегмент-проекции $(sg_2)_{xy}$

Fig. 5. Initial data for constructing the $(sg_2)_{xy}$ projection segment

Решение системы уравнений позволяет получить множество корней (четвёрок u_0, u_1, v_0, v_1) в количестве 16, из которых только четыре вещественных, приводящих к двум решениям. Эти решения позволяют построить два сегмента пространственных РН-кривых. Ниже приводятся вычисления и визуализация одного из них:

$$u_0 = 0,611, u_1 = 1,788, v_0 = -2,141, v_1 = 0,442.$$

2. Вычисляются полиномы-проекции годографа искомой кривой:

$$\begin{aligned} x'(t) &= u^2(t) - v^2(t) = (u_0 t + u_1)^2 - (v_0 t + v_1)^2 = \\ &= (0,611t + 1,788)^2 + (-2,141t + 0,442)^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y'(t) &= 2u(t) \cdot v(t) = 2(u_0 t + u_1)(v_0 t + v_1) = \\ &= 2(0,611t + 1,788) \cdot (-2,141t + 0,442). \end{aligned}$$

3. Вычисляется полином $\sigma(t)$:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)} = u^2(t) + v^2(t) = \\ &= (0,611t + 1,788)^2 + (-2,141t + 0,442)^2. \end{aligned}$$

4. Определяются полиномы $a(t)$ и $b(t)$ заданием параметра k , например, $k = 1$:

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{\sigma(t) + 1}{2} = \\ &= \frac{1}{2}((0,611t + 1,788)^2 + (-2,141t + 0,442)^2 + 1), \end{aligned}$$

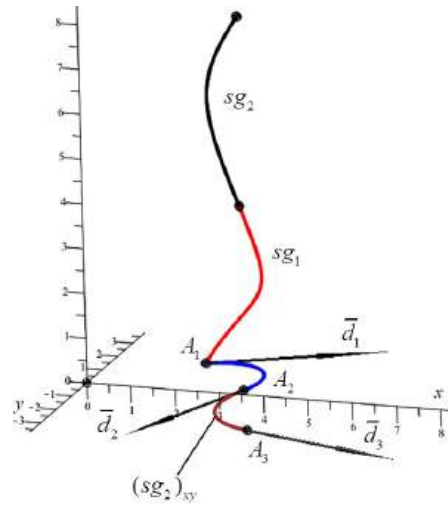


Рис. 6. Визуализация составной пространственной РН-кривой

Fig. 6. Visualization of the composite spatial PH-curve

$$\begin{aligned} b(t) &= \frac{\sigma(t) - 1}{2} = \\ &= \frac{1}{2}((0,611t + 1,788)^2 + (-2,141t + 0,442)^2 - 1). \end{aligned}$$

5. Вычисляется полином — третья проекция $z'(t)$ годографа искомой кривой:

$$\begin{aligned} z'(t) &= 2a(t) \cdot b(t) = \frac{\sigma^2(t) - 1}{2} = 0,4(4,957t^2 - \\ &- 4,079t + 4,394) \cdot (61,969t^2 - 50,999t + 29,93). \end{aligned}$$

6. Вычисляется параметрическая скорость искомой кривой:

$$\mu(t) = |\vec{r}'(t)| = \frac{ds}{dt} = \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t) + z'^2(t)},$$

$$\mu(t) = 12,2886[(t^2 - 0,547t + 0,609) \cdot (t^2 - 1,099t + 0,836)]$$

7. Определяются параметрические уравнения сегмента искомой РН-кривой:

$$x(t) = \int_0^t x'(t) \cdot dt + x_1 = -1,403t^3 - 0,1465t^2 + 3,003t + 2,$$

$$y(t) = \int_0^t y'(t) \cdot dt + y_1 = 0,8724t^3 - 4,099t^2 + 1,581t + 2,$$

$$\begin{aligned} z(t) &= \int_0^t z'(t) \cdot dt + z_1 = 2,457t^5 - \\ &- 5,056t^4 + 8,383t^3 - 6,924t^2 + 5,26t, z_1 = 0. \end{aligned}$$

8. Выполняется визуализация сегмента искомой РН-кривой (рис. 4).

Пример 2. Известны сегмент-проекция $(sg_1)_{xy}$ и пространственный сегмент sg_1 конструируемой составной РН-кривой (данные из примера 1). Известен также касательный вектор $\vec{d}_3(2,1)$ в конечной точке A_3 второго сегмента sg_2 , стыкующегося с сегментом sg_1 в их общей точке A_2 по гладкости C^1 (по общему касательному вектору $\vec{d}_2$) (рис. 5). Требуется построить сегмент sg_2 составной РН-кривой и записать его параметрические уравнения: $X(\tau)$, $Y(\tau)$, $Z(\tau)$, $\tau \in [\tau_1 = 0, \tau_2 = 1]$.

Алгоритм решения.

1. Вычисляются координаты конечной точки A_2 сегмента-проекции $(sg_1)_{xy}$ составной РН-кривой под-

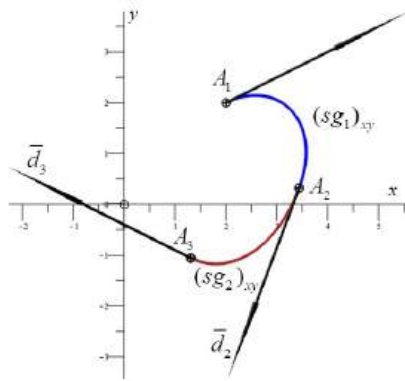


Рис. 7. Визуализация сегмент-проекций $(sg_1)_{xy}$ и $(sg_2)_{xy}$ при $\bar{d}_3(-2,1)$
Fig. 7. Visualization of $(sg_1)_{xy}$ and $(sg_2)_{xy}$ segment projections at $\bar{d}_3(-2,1)$

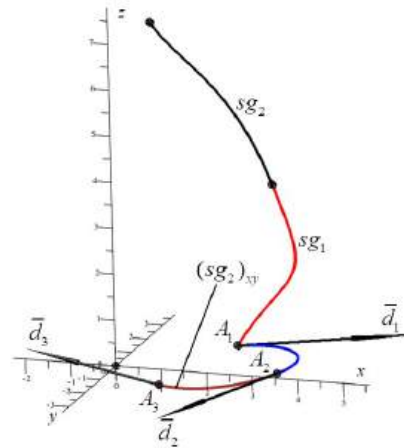


Рис. 8. Визуализация составной РН-кривой при $\bar{d}_3(-2,1)$
Fig. 8. Visualization of the composite PH-curve at $\bar{d}_3(-2,1)$

становкой значения параметра $t=1$ в уравнения сегмент-проекций $(sg_1)_{xy}$: $x(t)$, $y(t)$ (в п. 7 примера 1). $A_2(3,437; 0,322)$.

2. По исходным данным и по координатам точки A_2 строится проекция $(sg_2)_{xy}$ (рис. 6), затем сам сегмент sg_2 в пространстве. Уравнения сегмента sg_2 :

$$\begin{aligned} X(\tau) &= \int_0^\tau X'(\tau) \cdot d\tau + X_1 = \\ &= -0,555\tau^3 + 3,082\tau^2 - 1,5\tau + 3,437, \\ Y(\tau) &= \int_0^\tau Y'(\tau) \cdot d\tau + Y_1 = \\ &= +0,544\tau^3 + 0,682\tau^2 - 4\tau + 0,322, \\ Z(\tau) &= \int_0^\tau Z'(\tau) \cdot d\tau + Z_1 = 0,544\tau^5 - \\ &- 2,008\tau^4 + 5,298\tau^3 - 7,354\tau^2 + 8,625\tau + 4,11, \end{aligned}$$

где $X_1 = x_{A_2}$, $Y_1 = y_{A_2}$, $Z_1 = z(t=1)$.

На рис. 7 и 8 приведён результат конструирования пространственной РН-кривой для изменённой проекции вектора $\bar{d}_3(-2,1)$.

Заключение

Предложен подход к конструированию пространственной РН-кривой на основе последовательного конструирования её плоских образов, отличающийся от известного аналитического конструирования в пространстве. Этапу появления образов предшествует нахождение соответствующих им годографов в тех же плоскостях, которые геометрически представляют собой линейную и нелинейную (круговую) ортогональные проекции пространственного годографа искомой РН-кривой. Изначально принимается, что каждая из этих проекций удовлетворяет пифагорову условию, необходимому для конструирования пространственной РН-кривой.

В качестве исходных данных для конструирования принимаются проекции векторов касательных в начальной и конечной точках конструируемой РН-кривой на горизонтальной плоскости. В числовых примерах приведены алгоритмы конструирования, демонстрирующие особенности процесса последовательного формирования кривой с использованием плоскостей проекций.

Как следует из алгоритмов, управление формой конструируемой РН-кривой возможно за счёт изменения касательных векторов в ее начальной и конечной точках. При этом начальная точка опре-

деляет положение РН-кривой в пространственной системе координат. Показана возможность конструирования кусочной пространственной РН-кривой по гладкости C^1 стыковки её сегментов.

Список источников / References

1. Farouki R. T. Pythagorean-hodograph curves: Algebra and geometry inseparable. Germany: Springer, 2008. 729 p. DOI: 10.1007/978-3-540-73398-0. ISBN 978-3-540-73397-3.
2. Farouki R. T., Sakkalis T. Pythagorean-hodograph space curves. *Advances in Computational Mathematics*. 1994. No. 2. P. 41–66. DOI: 10.1007/BF02519035.
3. Pottmann H. Curve design with rational Pythagorean-hodograph curves. *Advances in Computational Mathematics*. 1995. No. 3. P. 147–170. DOI: 10.1007/BF03028365.
4. Farouki R. T. Arc lengths of rational Pythagorean-hodograph curves. *Computer Aided Geometric Design*. 2015. No. 34. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.03.007.
5. Farouki R. T. The elastic bending energy of Pythagorean-hodograph curves. *Computer Aided Geometric Design*. 1996. No. 13. P. 227–241. DOI: 10.1016/0167-8396(95)00024-0.
6. Винокурский Д. Л., Ганьшин К. Ю., Мезенцева О. С. [и др.]. Планирование траектории группы беспилотных летательных аппаратов с использованием годографа Пифагора и составных кривых Бернштейна-Безье на плоскости // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2020. Т. 31, № 2. С. 70–78. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-70-78. EDN: DWGUPX.
7. Vinokurskiy D. L., Gan'shin K. Yu., Mezentseva O. S. [et al.]. Planirovaniye trayektorii gruppy bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniyem godografa Pifagora i sostavnykh krivyykh Bernshteyna-Bez'ye na ploskosti [The planning of the trajectory of UAV group with the performance of pythagorean hodograph and Bernstein-Bezier composite curves in the plane]. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskiye nauki. Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. Vol. 31, no. 2. P. 70–78. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-31-2-70-78. EDN: DWGUPX. (In Russ.).
8. Farouki R. T. Pythagorean-hodograph curves in practical use. *Geometry Processing for Design and Manufacturing. Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1992. P. 3–33.
9. Shah M. A., Aouf N. 3D cooperative Pythagorean hodograph path planning and obstacle avoidance for multiple UAVs. *IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems, CIS*. 2010. P. 1–6. DOI: 10.1109/UKRICIS.2010.5898124.
10. Vinokursky D. L., Mezentseva O. S., Samoylov Ph. V. [et al.]. Model predictive control for path planning of UAV group.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: III International Scientific Conference. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd. 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1155/1/012092.

10. Ганьшин К. Ю., Винокурский Д. Л., Мезенцева О. С. [и др.]. Разработка метода оптимизации траектории облета среды с препятствиями на основе кривых Безье с годографом Пифагора // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 7(103). С. 156–165. EDN: KRTRRN.

Gan'shin K. Yu., Vinokurskiy D. L., Mezentseva O. S. [et al.]. Razrabotka metoda optimizatsii trayektorii obleta sredy s prepyatstviyami na osnove krivyykh Bez'ye s godografom Pifagora [Development of a method for optimizing the trajectory of a obstacle-free environment based on Bezier curves with a Pythagorean hodograph]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2023. No. 7(103). P. 156–165. EDN: KRTRRN. (In Russ.).

11. Винокурский Д. Л., Ганьшин К. Ю., Мезенцева О. С. [и др.]. Генерация траекторий оптимальных кривых беспилотного летательного аппарата для обхода статического препятствия // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 9(81). С. 169–181. EDN: LPFIMQ.

Vinokurskiy D. L., Gan'shin K. Yu., Mezentseva O. S. [et al.]. Generatsiya trayektoriy optimal'nykh krivyykh bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya obkhoda staticheskogo prepyatstviya [Generating trajectories of optimal curves of an unmanned aerial vehicle to bypass a static obstacle]. *Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don*. 2021. No. 9(81). P. 169–181. EDN: LPFIMQ. (In Russ.).

12. Bezawada H., Woods C., Vikas V. Shape estimation of soft manipulators using piecewise continuous Pythagorean-hodograph curves. *American Control Conference (ACC)*. 2022. P. 2905–2910. DOI: 10.23919/ACC53348.2022.9867270.

13. Bruyninckx H., Reynaerts D. Path planning for mobile and hyper-redundant robots using Pythagorean-hodograph curves. *Advanced Robotics: 8th International Conference*. 1997. P. 595–600. DOI: 10.1109/ICAR.1997.620243.

14. Farouki R. T., Knez M., Vitrih V. [et al.]. Planar projections of spatial Pythagorean-hodograph curves. *Computer Aided Geometric Design*. 2021. Vol. 91. P. 102049. DOI: 10.1016/j.cagd.2021.102049.

15. Panchuk K. L., Myasoedova T. M., Rogoza Y. A. Spatial spline construction through the Monge model. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2744. P. 60-1–60-11. DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-3-60.

16. Корчагин Д. С., Панчук К. Л. Программа «Вычисление кривизны и кручения пространственной кривой линии по ее ортогональным проекциям» // *Хроники объединённого фонда электронных ресурсов «Наука и образование»*. 2014. Т. 1, № 2 (57). С. 60. EDN: SXMEQB.

Korchagin D. S., Panchuk K. L. Programma "Vychisleniye krivizny i krucheniya prostranstvennoy krivoy linii po eye ortogonal'nykh proyeksiyam" [The program "Calculating the curvature and torsion of the dimensional curve based on its orthogonal projections"]. *Khroniki Ob'yedinennogo Fonda Elektronnykh Resursov "Nauka i Obrazovaniye"*. 2014. Vol. 1, no. 2 (57). P. 60. EDN: SXMEQB. (In Russ.).

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

SPIN-код: 5623-0008

AuthorID (РИНЦ): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Адрес для переписки: Panchuk_KL@mail.ru

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

SPIN-код: 6056-6455

AuthorID (РИНЦ): 686836

ORCID: 0000-0002-9641-9417

AuthorID (SCOPUS): 57201776004

ResearcherID: E-7505-2014

Адрес для переписки: mtm44mtm44@mail.ru

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

SPIN-код: 8144-6370

AuthorID (РИНЦ): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

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

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

Статья поступила в редакцию 21.05.2025; одобрена после рецензирования 03.07.2025; принята к публикации 25.08.2025.

PANCHUK Konstantin Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5623-0008

AuthorID (RSCI): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Correspondence address: Panchuk_KL@mail.ru

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

SPIN-code: 6056-6455

AuthorID (RSCI): 686836

ORCID: 0000-0002-9641-9417

AuthorID (SCOPUS): 57201776004

ResearcherID: E-7505-2014

Correspondence address: mtm44mtm44@mail.ru

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

SPIN-code: 8144-6370

AuthorID (RSCI): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

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

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

The article was submitted 21.05.2025; approved after reviewing 03.07.2025; accepted for publication 25.08.2025.

СТРУКТУРНАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АССОЦИИРОВАННЫХ МНОЖЕСТВ КРИВЫХ

В. Ю. Юрков, М. А. Чижик, И. А. Шевелёва

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье описывается итерационный алгоритм построения однопараметрического семейства множеств взаимно связанных кривых. Взаимная связь означает существование взаимно однозначного и непрерывного соответствия между точками кривых. Каждое множество кривых семейства удовлетворяет своему набору граничных условий, оставляющих свободным один параметр для каждой кривой множества. Этот параметр позволяет организовать итерационный процесс приближения каждой кривой к заданному для неё набору граничных условий. Подробно рассмотрен частный случай описанного подхода, в котором предлагается структурная геометрическая модель прогнозирования формы трехслойного тканевого пакета, изгибающегося под действием внешней силы. Геометрическая модель нормального поперечного сечения такого пакета представляет собой однопараметрическое семейство взаимно связанных парабол высших степеней. Свободный параметр функционально связан с суммарной жесткостью пакета. Зависимость суммарной жесткости от компонентов пакета может быть определена только экспериментально. В статье эта зависимость предполагается линейной. Одним из условий построения однопараметрического семейства является постоянство длин дуг взаимно связанных кривых. Предложенный подход может быть применен к решению ряда теоретических и прикладных задач инженерной геометрии в области конструирования многослойных тканевых пакетов.

Ключевые слова: геометрическая форма, параметризация, прогнозирование, взаимно связанные кривые, однопараметрическое множество, многослойный тканевый пакет, деформация.

Для цитирования: Юрков В. Ю., Чижик М. А., Шевелёва И. А. Структурная геометрическая модель ассоциированных множеств кривых // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 12–17. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-12-17. EDN: KQTVOK.



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

STRUCTURAL GEOMETRIC MODEL OF ASSOCIATED SETS OF CURVES

V. Yu. Yurkov, M. A. Chizhik, I. A. Sheveleva

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The paper is devoted to an iterative algorithm for constructing a one-parameter family of sets of mutually connected curves. Mutual connection means existence some one-to-one and continuous correspondence between the points of the curves. Each set of curves in the family satisfies its own set of boundary conditions that leave one parameter free for each curve of the set. This parameter allows us to organize an iterative process of approaching for each curve to the set of boundary conditions set for it. A special case of the described approach is considered in detail. The structural geometric model for predicting the shape of three-layer fabric package is proposed. Deformation of the package occurs through the action of an external force. The structural geometric model of normal cross-sectional image of such package is a one-parameter family of interconnected parabolas of higher degrees. Only one free parameter is connected functionally with the total stiffness of the package. The total stiffness of the package and its function can only be determined experimentally. In the paper, we consider this function as a linear one. One of the conditions for constructing one-parameter family is constancy of the lengths of arcs of mutually connected curves. Proposed approach may be applied to solving a number of theoretical and applied problems of engineering geometry in the field of designing multilayer fabric packages.

Keywords: geometric shape, parameterization, forecasting, mutually connected curves, one-parameter set, multilayer fabric package, deformation.



Введение

Прогнозирование изменения геометрической формы, описанной в виде отсека кривой или поверхности, обычно моделируется однопараметрическим семейством кривых или поверхностей, определенном на некотором, достаточно малом промежутке изменения параметра. Если же отсеки принадлежат разным геометрическим объектам, но тем не менее взаимно связаны друг с другом, то есть, если между ними существует какое-либо соответствие, необходимо включать в изучение однопараметрическое семейство соответствий (гомотопии). Такого рода геометрические задачи встречаются, например, в моделировании многофакторных технологических процессов.

Довольно сложной проблемой является прогнозирование изменения формы элементов конструкций, выполненных из материалов, в которых деформации не следуют закону Гука. Такого рода конструкции часто встречаются в архитектурных сооружениях. К ним относятся, например, тентовые шатровые оболочки [1]. Формообразование таких объектов изучено мало, что приводит к возникновению ошибок в проектировании, конструировании и раскрое. Для расчета таких объектов применяются схемы разбивки на элементы ромбовидной или треугольной формы (метод конечных элементов).

Проблема формообразования и прогнозирования существует и в проектировании одежды [2, 3]. Характер формообразования зависит от жесткости ткани, способа закрепления деталей, сил трения между поверхностями тканей, жесткости элементов конструкции и многих других факторов. С учетом жесткости ткани созданы модели, имитирующие поведение тканевой конструкции на различных опорных поверхностях, в частности, на манекене [4, 5].

Однако во всех опубликованных исследованиях изучалось формообразование тканевого пакета, состоящего из одного слоя материала. Многослойные тканевые пакеты встречаются в авиастроении. Но они, как правило, состоят из нескольких склеенных слоев ткани. Такая многослойная конструкция при формообразовании ведет себя как единое целое.

В настоящей работе рассмотрена структурная геометрическая модель взаимно связанных плоских кривых, имитирующая формообразование сечения тканевой трехслойной конструкции (пакета), состоящей из покровных тканей — верхней и нижней и мягкого наполнителя. Покровные ткани жестко связаны друг с другом только по периметру трехслойного пакета. Поэтому поведение покровных тканей при изгибе различно. Деформация пакета происходит под действием внешней изгибающей силы. Форма опорной поверхности может быть разной, и она влияет на форму и складкообразование тканевых элементов многослойного пакета.

Ассоциированные множества

Пусть в n -мерном пространстве E^n с координатной системой $O_{x_1 \dots x_n}$ имеются два точечных мно-

жества $A = \{A_1, \dots, A_p\}$ и $B = \{B_1, \dots, B_q\}$. Пусть известны координаты каждой точки $A_i(a_{1i}, \dots, a_{ni})$, $B_j(b_{1j}, \dots, b_{nj})$, $i = 1, \dots, p$, $j = 1, \dots, q$. Множества A и B назовем ассоциированными, если существуют две системы функций $b_{kj} = f_{kj}(a_{1i}, \dots, a_{ni})$, $a_{ki} = g_{ki}(b_{1j}, \dots, b_{nj})$, $k = 1, \dots, n$. Обозначим такие множества $A \sim B$. Будем считать множества ассоциированными и в том случае, когда существует только одна система функций. Если $p = q$ и f_{kj} — линейные, то множества являются взаимно ассоциированными и $g_{ki} = f_{kj}^{-1}$. Другими словами, любое изменение хотя бы одной координаты хотя бы одной точки любого множества (деформация множества) вызовет соответствующее изменение положений всех точек другого множества.

Возможны различные частные случаи ассоциированности множеств. Например, если $b_{kj} = f_{kj}(a_{ki})$, то деформация множества A только в направлении оси Ox_k приведет к деформации множества B тоже только вдоль этой же оси. Если для всех значений i, j какие-либо координаты a_{ki} , b_{kj} остаются постоянными, то система $A \sim B$ является расслоенной в пучке гиперплоскостей, перпендикулярных оси Ox_k . Возможны варианты, при которых изменение координат какой-либо точки множества B зависит от изменения координат не всех точек множества A , а некоторого его подмножества. И наоборот. Такие случаи соответствуют принципу «ближайших соседей» или принципу стратификации множества A .

Если два множества являются линейно ассоциированными, т. е. все уравнения связи координат всех их точек — линейные, то для расчета коэффициентов этих уравнений необходимо иметь $np + 1$ «моментальных снимков» конфигурации точек этих множеств, если $p > q$, и $pq + 1$ «моментальных снимков», если $p < q$.

Таким способом можно получить $n^2pq + pq$ систем линейных уравнений порядка $np + 1$ или $n^2pq + pq$ систем линейных уравнений порядка $pq + 1$.

Пример 1. Пусть $A = \{A_1, A_2\}$, $B = \{B_1, B_2, B_3, B_4\}$, $n = 2$, $p = 2$, $q = 4$. Уравнения связи

$$x_{B1} = a_1^x \cdot x_{A1} + a_2^x \cdot x_{A2} + b_1^x \cdot y_{A1} + b_2^x \cdot y_{A2} + c_1^x,$$

$$y_{B1} = a_1^y \cdot x_{A1} + a_2^y \cdot x_{A2} + b_1^y \cdot y_{A1} + b_2^y \cdot y_{A2} + c_1^y,$$

$$xB_2 = \dots, \text{ и т. д.}$$

Пусть имеется только два «моментальных снимка»: $A_1^1(0, 0)$, $A_2^1(1, 0)$, $B_1^1(-1, 0)$, $B_2^1(0, -1)$, $B_3^1(2, 0)$, $B_4^1(0, 1)$ и $A_1^2(1, 1)$, $A_2^2(2, 1)$, $B_1^2(0, 2)$, $B_2^2(2, -1)$, $B_3^2(3, 0)$, $B_4^2(2, 2)$. Системы линейных уравнений являются неопределенными. Поэтому выберем одно из множества возможных решений:

$$x_{B1} = x_{A2} - 2, y_{B1} = 2y_{A1}, x_{B2} = 2x_{A1}, y_{B2} = x_{A1} - x_{A2},$$

$$x_{B3} = 2x_{A2} - x_{A1}, y_{B3} = 0, x_{B4} = 2x_{A1}, y_{B4} = y_{A2} + 1.$$

Для этого решения имеем следующие варианты:
— если $A_1^3(3, 2)$, $A_2^2(2, 1)$, то $B_1^3(2, 4)$, $B_2^3(6, -1)$, $B_3^3(5, 0)$, $B_4^3(6, 3)$;

— если $A_1^3(3, -1)$, $A_2^2(4, -1)$, то $B_1^3(2, -2)$, $B_2^3(6, -1)$, $B_3^3(5, 0)$, $B_4^3(6, 0)$; и т. д.

Рассмотрим другой вид ассоциированности множеств — ассоциированность через параметры. Пусть $\Phi(A)$ и $\Phi(B)$ — две фигуры в пространстве E^n , A и B — векторы их параметров в соответствующих пространствах параметров. Можно утверждать, что $A \sim B \leftrightarrow \Phi(A) \sim \Phi(B)$.

Пример 2. Пусть $\Phi(A)$ — две параболы в E^2 . Пусть их уравнения соответственно $y = x^2 - 2x$ и $y = x^2/2 - 3x + 2,5$. Тогда $A = \{A^1 = \{1, -2, 0\}, A^2 = \{1/2, -3, 2,5\}\}$. Пусть $\Phi(B)$ — две кубические параболы в E^2 . Пусть их уравнения соответственно $y = 16/3x^3 - 16x^2 + 32/3$ и $y = 1/3x^3 - 2x^2 + 8/3$. Тогда $B = \{B^1 = \{16/3, -16, 32/3, 0\}, B^2 = \{1/3, -2, 8/3, 0\}\}$. Для построения линейной ассоциированности множеств необходимо иметь семь «моментальных снимков» положений образов в пространстве параметров. Нам дано только два. Поэтому системы линейных уравнений являются неопределенными, что позволяет выбрать любое решение из бесконечного множества. Выберем одно из самых простых, например: $b_1 = -2a_3 + 16/3$, $b_2 = 7a_3 - 16$, $b_3 = -16/5a_3 + 32/3$, $b_4 = 0$.

Если теперь $A^3 = \{1/4, -2, 3\}$, то $B^3 = \{-2/3, 5, 16/15, 0\}$.

Очевидны следующие свойства ассоциированных множеств:

- если $A \sim B$, то $B \sim A$;
- если $A \sim B$ и $B \sim C$, то $A \sim C$.

Задачи инженерной геометрии, связанные с ассоциированными множествами, встречаются в различных областях науки. Например, они могут встречаться при геометрическом моделировании взаимодействий физических полей [6–8]. При этом на некоторые точки одного скалярного поля может оказывать воздействие совокупность соседних точек другого скалярного поля, что соответствует принципу ближнего действия, или совокупность отдаленных точек, что соответствует принципу дальнего действия. С ассоциированными множествами кривых связаны задачи из разных областей науки и техники, например [9, 10].

Обозначения и определения

Обозначим $[AB]$ дугу кривой — образ отрезка $[a, b]$ действительной числовой прямой, $f[a, b] = [AB]$, $f(a) = A$, $f(b) = B$. Длину дуги обозначим $L[AB]$.

Дуга $[A^iB^j]$ есть элемент некоторого множества $M = \{[A^1B^1], \dots, [A^mB^m]\}$ дуг.

Дуга $[A^iB^j]$ есть член некоторого однопараметрического семейства $T = \{[A_0^iB_0^j], \dots, [A_1^iB_1^j]\}$, $0 \leq t \leq 1$.

Ассоциированным множеством M дуг кривых назовем такое множество M , которое подчиняется следующим условиям:

1. $\forall i, j: i \neq j \exists f_i: [A^iB^i] \leftrightarrow [A^jB^j]$;
2. $\forall i \exists f_0^i: [a^i, b^i] \leftrightarrow [A^iB^i]$.

Здесь f_i — взаимно однозначное и непрерывное отображение.

Ассоциированным семейством T назовем такое семейство $\{M\}$, которое подчиняется следующим условиям:

1. Каждая дуга $[A^iB^j]$ задается совокупностью $G_i(t)$ своих граничных условий, определяющих её так, что остается один свободный параметр;

$$2. \forall i, t: \exists f_i: [A^iB^i] = M_i^* \cap T_i;$$

$$3. L[A^iB^i] = k_i \cdot L[A_0^iB_0^i].$$

Предположим, что все дуги принадлежат классу C^* на своем отрезке действительной числовой оси.

Постановка задачи

Пусть дано ассоциированное множество M_0 , то есть все дуги $[A_0^iB_0^i]$ полностью определены и известны их длины $L_0^i = L[A_0^iB_0^i]$. Пусть задано структурированное множество $G_i(t)$ граничных условий и множество коэффициентов k_i . Задача заключается в том, чтобы построить однопараметрическое ассоциированное семейство T , каждое ассоциированное множество которого удовлетворяет своему набору граничных условий из заданного структурированного множества. При этом каждая дуга ассоциированного множества удовлетворяет своему набору граничных условий. Для однозначности решения необходимо, чтобы каждая дуга была метрически связана со всеми остальными дугами и с дугами $[A_0^iB_0^i]$. Метрическую связь можно установить соотношениями длин дуг. Точное решение задачи в общем виде довольно сложно. Поэтому приведем её к дискретной форме и применим итерационный метод с последующей аппроксимацией дискретных данных.

Общий алгоритм решения задачи

Опишем алгоритм решения при следующих ограничениях:

— все указанные множества и семейства будем считать плоскими в евклидовом двумерном пространстве;

— все заданные и искомые дуги аналитически будем записывать в виде $y = f(x)$;

— дискретизация для всех элементов будет основана на одном и том же принципе, то есть дуга $[A^iB^j]$ будет образом соответствующего отрезка $[a^i, b^j]$, несущего равномерную сетку $a_i^t = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b^j$.

Дискретизация задачи заключается в вычислении длин всех звеньев ломаной $C_0^iC_1^i\dots C_n^i$, вписанной в дугу $[A^iB^j]$ на основе построенной для неё сетки. Длины всех звеньев ломаной умножаются на один и тот же действительный коэффициент k_i . Задается закон изменения граничных условий $G_i(t)$ в зависимости от параметра t . По заданным законам изменения граничных условий при фиксированном значении параметра каждая дуга занимает некоторую область пространства. В этой области выбирается одна точка, которая позволяет из однопараметрического множества дуг выбрать конкретную дугу. Таким способом строятся дуги $[A^iB^j]$. Эти выбранные точки и построенные с их помощью дуги являются начальным приближением итерационного процесса. Если в каждую дугу $[A^iB^j]$ вписать ломаную с соответствующими длинами звеньев, то её последняя точка в общем случае не совпадет с крайней точкой дуги по причине случайного выбора положения промежуточной точки. Итерационный процесс заключается в пошаговом целенаправленном задании координат промежуточных точек в допустимой области, построении соответствующих дуг и вписывании в них соответствующих ломаных так, чтобы с каждой итерацией расстояние между крайними точками дуги и ломаной уменьшалось. Критерием остановки работы алгоритма будет некоторая заранее заданная величина и момент, когда расстояние между крайними точками дуги

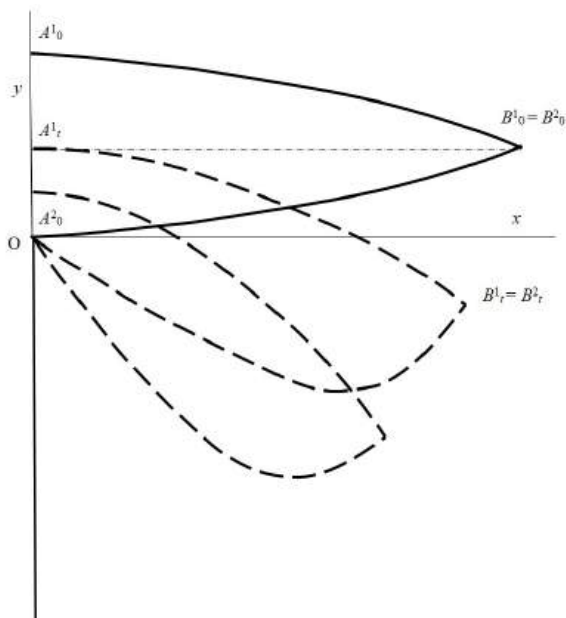


Рис. 1. Схема изменения формы трехкомпонентной тканевой системы на линейной опоре
Fig. 1. Shape change scheme of three-component tissue system on a linear support

и соответствующей ломаной, вычисленное в евклидовой метрике, окажется меньше заданной величины.

Структурная модель трехкомпонентного тканевого пакета

Рассмотрим частный случай, схема которого приведена на рис. 1. Схема представляет собой половину нормального поперечного сечения пакета в виде бесконечной полосы, состоящей из верхней покровной ткани, нижней покровной ткани и наполнителя. Пакет обладает определенной жесткостью, зависящей от жесткости тканей, жесткости и плотности наполнителя и многих других факторов, которые в данной работе не учитываются. Полоса опирается на прямолинейную узкую опору. Форма опоры может быть различной, но рассматриваются только частные случаи: линейная, плоская и цилиндрическая форма опоры. Ширина линейной опоры принята стремящейся к нулю. Пакет деформируется под действием собственного веса так, что его края опускаются, а форма покровной ткани меняется. Закон изменения формы всей трехслойной полосы непрерывен и зависит от суммарной жесткости пакета и формы опоры. Дифференциальные геометрические характеристики формы пакета в данной работе не исследуются.

Начало ортогональной системы координат поместим в точку опоры трехкомпонентной системы. Ассоциированное множество состоит из двух дуг ($m = 2$): $M_0 = \{[A^1_0 B^1_0], [A^2_0 B^2_0]\}$. Дуга $[A^1_0 B^1_0]$ изображает половину верхней покровной ткани, а дуга $[A^2_0 B^2_0]$ — нижней. Их структурированные модели в первом приближении: $y = a_{2,0}(t)x^2 + a_{0,0}(t)$, $y = a_{2,1}(t)x^2$, $t = 0$.

При этом $a_{2,0} = -a_{2,1}$. Пространство между дугами заполнено линиями связи соответственных точек дуг (на схеме не показаны), которые моделируют взаимно однозначное и непрерывное соответствие между дугами.

Граничные условия: $A^1_0(0, a_{1,0}), B^1_0(x_{B,0}, a_{0,0}/2) B^2_0 = B^1_0, A^2_0(0,0)$.

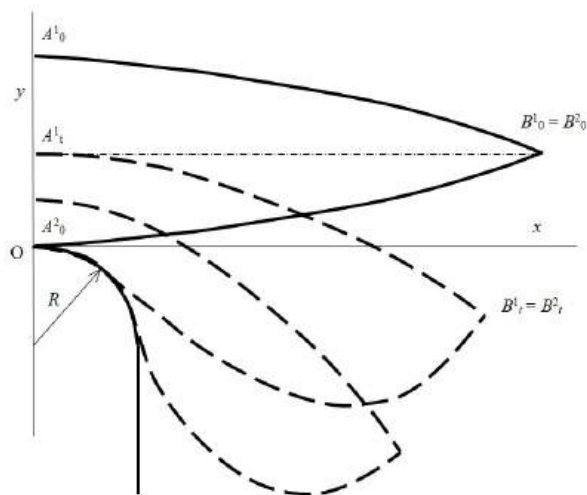


Рис. 2. Схема изменения формы трехкомпонентной тканевой системы на цилиндрической опоре
Fig. 2. Shape change scheme of three-component tissue system on a cylindrical support

Радиус кривизны: $R(A^1_t) = R_0, R(A^2_t) = 0$.

Длина дуги: $L[A^1_t B^1_t] = L[A^2_t B^2_t]$.

Условия образования семейства T^* :

$$x(A^1_t) = 0, y(A^1_t) = a_{0,0}(1-t), 0 \leq t \leq 1;$$

$$R(A^1_t) = R_0(1-t);$$

$$x(A^2_t) = 0, y(A^2_t) = 0; R(A^2_t) = 0;$$

$$\forall t, L[A^1_t B^1_t] = L[A^2_t B^2_t] = \text{const};$$

$$[A^1_t B^1_t] \cap [A^2_t B^2_t] = B^1_t = B^2_t.$$

Каждая дуга семейства $[A^2_t B^2_t]$ строится по следующему итерационному алгоритму.

Шаг 1. На $[0, x_{B,0}]$ строится равномерная сетка $0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n = x_{B,0}$. Для каждого узла x_i сетки вычисляется значение y_i параболы $[A^1_0 B^1_0]$.

Шаг 2. Вычисляются длины всех звеньев L_i ломаной, вписанной в параболу $[A^1_0 B^1_0]$. Вершинами ломаной являются узлы (x_i, y_i) .

Шаг 3. Вычисляется радиус кривизны R_0 и задается закон изменения радиуса $R(A^1_t) = R(t)$. Выше этот закон был принят линейным, но его более или менее истинный вид может быть установлен только экспериментально.

Шаг 4. Для выбранного значения параметра t по вершине A^1_t и радиусу $R(A^1_t)$ строится дуга $[A^1_0 B^1_0]$ параболы и в неё вписывается ломаная с длинами звеньев L_i . Последняя точка ломаной определяет точку $B^1_t(x_{B,t}, y_{B,t})$ дуги параболы.

Шаг 5. На $[0, x_{B,0}]$ выбирается некоторая точка (например, точка с абсциссой $x_{B,t}/2$) и в ней задается ордината $y(x_{B,t}/2)$.

Шаг 6. По трем точкам $(0, 0)$, $(x_{B,t}/2, y(x_{B,t}/2))$, $(x_{B,t}, y_{B,t})$ строится дуга параболы $[A^2_t B^2_t]$.

Шаг 7. В параболу $[A^2_t B^2_t]$, начиная с точки $(0, 0)$ вписывается ломаная с длинами звеньев L_i .

Шаг 8. Если расстояние между последней точкой вписанной ломаной и точкой B^1_t больше заранее заданной величины, то целенаправленно изменяется ордината $y(x_{B,t}/2)$ и выполняется возврат к шагу 6. Если длина ломаной оказывается больше длины параболы, то необходимо увеличить абсолютное значение ординаты, если меньше, то — уменьшить. Цикл шагов с 6 по 8 выполняется до тех пор, пока

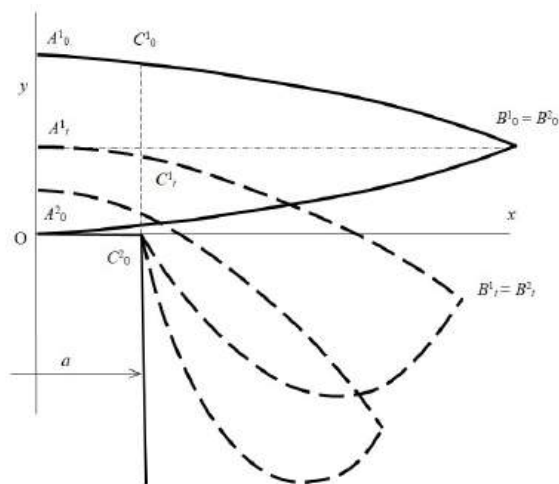


Рис. 3. Схема изменения формы трехкомпонентной тканевой системы на плоской опоре
Fig. 3. Shape change scheme of three-component tissue system on a flat support

расстояние между последними точками не станет меньше или равным заданной величине. В этом случае дугу $[A^2_1 B^2_1]$ можно считать найденной.

Шаг 9. Выбирается новое значение параметра t , и алгоритм повторяется с шага 4. Таким образом будет построено семейство Γ^* .

Для построения адекватной геометрической модели описанной системы необходимо экспериментально найти зависимость между параметром t и суммарной жесткостью системы.

В случае цилиндрической опоры семейства дуг $[A^1_1 B^1_1]$ и $[A^2_1 B^2_1]$ могут быть описаны уравнениями $y = a_{6,1}(t)x^6 + a_{4,1}(t)x^4 + a_{2,1}(t)x^2$, каждое из которых определяется на соответствующем отрезке оси абсцисс (рис. 2).

В случае плоской опоры каждая дуга семейства дуг $[A^2_1 B^2_1]$ состоит из прямолинейного участка $[A^2_0 C^2_0]$ и параболического участка $[C^2_0 B^2_1]$. Параболический участок может быть описан уравнениями вида $y = a_{2,1}(t)x^2 + a_{1,1}(t)x + a_{0,1}$, каждое из которых определяется на соответствующем отрезке оси абсцисс (рис. 3).

Заключение

Рассмотрена возможность геометрического моделирования ассоциированных множеств, т. е. множеств, элементы одного из которых зависят от всех или некоторых элементов другого множества. Геометрическая модель получается многомерной и ассоциированность множеств выражается системами взаимосвязанных уравнений.

Предложен алгоритм построения однопараметрического семейства множеств взаимно связанных кривых, удовлетворяющих соответствующим множествам граничных условий. Оставленный свободным параметр служит для организации итерационного процесса приближения построенных кривых к соответствующим граничным условиям. Форма кривых определяется структурой аппроксимирующей функции и значениями числовых коэффициентов.

Рассмотрен практический пример применения описанного подхода. Он заключается в построении прогнозирующей геометрической модели изменения формы трехслойного тканевого пакета, находящегося под воздействием внешней силы. Сво-

бодный параметр имитирует суммарную жесткость пакета. Описанный подход возможен для численного моделирования многослойных пакетов, но этот вопрос мы оставляем для следующих публикаций, как и вопрос о суммарной жесткости пакета.

Список источников / References

1. Кудрявцева В. И., Удлер Е. М. Численное моделирование геометрии тентовых шатров на жестком квадратном контуре // Фундаментальные исследования. 2017. № 10. С. 466–470. EDN: ZRRAMX.
Kudryavtseva V. I., Udler E. M. Chislennoye modelirovaniye geometrii tentovykh shatrov na zhestkom kvadratnom konture [Numerical modeling of the geometry of tent marquees on a hard square contour]. *Fundamental'nyye issledovaniya. Fundamental Research*. 2017. No. 10. P. 466–470. EDN: ZRRAMX. (In Russ.).
2. Усов А. Г., Коровкин В. В. Об исследовании механических свойств текстильного полотна при его изгибе // Швейная промышленность. 2010. № 1. С. 26–28.
Usov A. G., Korovkin V. V. Ob issledovanii mekhanicheskikh svoystv tekstil'nogo polotna pri ego izgibe [About researches of textile cloths mechanical properties in its bending]. *Shveytnaya promyshlennost'*. 2010. No. 1. P. 26–28. (In Russ.).
3. Смирнова Н. А., Козловский Д. А. Совершенствование метода оценки жесткости на изгиб текстильных полотен // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2005. № 2. С. 12–15. EDN: HSAQBN.
Smirnova N. A., Kozlovskiy D. A. Sovershenstvovaniye metoda otsenki zhestkosti na izgib tekstil'nykh poloten [The modification of method for determination of bending rigidity of textile linen]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2005. No. 2. P. 12–15. EDN: HSAQBN. (In Russ.).
4. Артикбаева Н. М., Нигматова Ф. У., Шин И. Г. Особенности складкообразования для оценки формоустойчивости тканевых оболочек, пропитанных полимерной композицией // Universum: технические науки. 2023. № 1 (106). С. 9–15. DOI: 10.32743/UniTech.2023.106.1.14898. EDN: KBKNQP.
Artikbayeva N. M., Nigmatova F. U., Shin I. G. Osobennosti skladkoobrazovaniya dlya otsenki formoustoychivosti tkanevykh obolochek, propitannykh polimernoy kompozitsiyey [Features of folding for evaluation of form stability of fabric shells impregnated with a polymer composition]. *Universum: tekhnicheskiye nauki. Universum: Technical Sciences*. 2023. No. 1 (106). P. 9–15. DOI: 10.32743/UniTech.2023.106.1.14898. EDN: KBKNQP. (In Russ.).
5. Максач В. В., Чижик М. А., Юрков В. Ю. Разработка математической модели процесса формообразования поверхности из драпируемых материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2024. Т. 65, № 1. С. 9–14. DOI: 10.46418/0021-3489_2024_65_01_02. EDN: TIKPUZ.
Maksach V. V., Chizhik M. A., Yurkov V. Yu. Razrabotka matematicheskoy modeli protsessa formoobrazovaniya poverkhnosti iz drapiruyemykh materialov [Development of a mathematical model of the process of shape formation of a surface from draped materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti. The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*. 2024. Vol. 65, no. 1. P. 9–14. DOI: 10.46418/0021-3489_2024_65_01_02. EDN: TIKPUZ. (In Russ.).
6. Гребенников Р. В. Решение задачи об оптимальном поведении толпы с использованием метода оптимизации роя частиц // Вестник Воронежского государственного университета. Системный анализ и информационные технологии. 2009. № 2. С. 107–111. EDN: KZJGIV.
Grebennikov R. V. Resheniye zadachi ob optimal'nom povedenii tolpy s ispol'zovaniyem metoda optimizatsii roya

chastits [The solving of the optimal crowd behavior problem, based on the method particle swarm optimization]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii. Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2009. No. 2. P. 107–111. EDN: KZJGIV. (In Russ.).

7. Погребной А. Е., Самодуров А. С. Эволюция перемешанных слоев в стратифицированной области черноморского антициклонического вихря // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 6. С. 704. DOI: 10.7868/S0002351514060121. EDN: SYYYMH. (In Russ.).

Pogrebnoy A. E., Samodurov A. S. Evolyutsiya peremeshannykh sloeyev v stratifitsirovannoy oblasti chernomorskogo antitsiklonicheskogo vikhrya [Evolution of mixed layers in a stratified region of the black sea anticyclonic eddy]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Fizika Atmosfery i Okeana*. 2014. Vol. 50, no. 6. P. 704. DOI: 10.7868/S0002351514060121. EDN: SYYYMH. (In Russ.).

8. Серафимов Л. А., Челюскина Т. В., Бушина Д. И. Особенности диаграмм скалярных полей температур и векторных полей над трехкомпонентных двухфазных систем // *Теоретические основы химической технологии*. 2006. Т. 40, № 6. С. 645–651. EDN: HVTANT.

Serafimov L. A., Chelyuskina T. V., Bushina D. I. Osobennosti diagramm skalyarnykh poley temperatur i vektornykh poley nad trekhkomponentnykh dvukhfaznykh sistem [Specific features of temperature scalar field and tie-line vector field diagrams for three-component two-phase systems]. *Teoreticheskiye Osnovy Khimicheskoy Tekhnologii*. 2006. Vol. 40, no. 6. P. 645–651. EDN: HVTANT. (In Russ.).

9. Акопянц Г. Ц. Разбиение плоскости регулярной системой кривых // *Вестник Национального политехнического университета Армении. Информационные технологии, электроника, радиотехника*. 2021. № 2. С. 22–29. DOI: 10.53297/18293336-2021.2-22. EDN: WIGQGA.

Akopyants G. Ts. Razbiyeniye ploskosti regul'arnoy sistemoy krivyykh [Cutting a plane by a regular curve system]. *Vestnik Natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta Armenii. Informatsionnyye tekhnologii, elektronika, radiotekhnika. Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. Information Technologies, Electronics, Radio Engineering*. 2021. No. 2. P. 22–29. DOI: 10.53297/18293336-2021.2-22. EDN: WIGQGA. (In Russ.).

10. Хохлов А. В. Кривые ползучести, порождаемые нелинейной моделью течения тиксотропных вязкоупругопластических сред, учитывающей эволюцию структуры // *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. 2024. № 4. С. 42–51. DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-4-6. EDN: JJHLSN.

Khokhlov A. V. Krivyye polzuchesti, porozhdayemye nelineynoy model'yu techeniya tikotropnykh vyazkouprugoplasticheskikh sred, uchityvayushchey evolyutsiyu struktury [Creep curves generated by a nonlinear flow model for tixotropic viscoelastic media with consideration of structure evolution]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika*. 2024. No. 4. P. 42–51. DOI: 10.55959/MSU0579-9368-1-65-4-6. EDN: JJHLSN. (In Russ.).

ЮРКОВ Виктор Юрьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Конструирование и технологии изделий легкой

промышленности» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2414-1438

AuthorID (РИНЦ): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Адрес для переписки: viktor_yurkov@mail.ru

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

SPIN-код: 7582-7019

AuthorID (РИНЦ): 474040

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

ORCID: 0000-0003-0797-875X

Адрес для переписки: margarita-chizhik@rambler.ru

ШЕВЕЛЁВА Инна Александровна, старший преподаватель кафедры «Дизайн костюма» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2224-1971

AuthorID (РИНЦ): 716314

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

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 17.10.2025.

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

SPIN-code: 2414-1438

AuthorID (RSCI): 173644

AuthorID (SCOPUS): 55857657200

ORCID: 0000-0003-2667-8103

Correspondence address: viktor_yurkov@mail.ru

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

SPIN-code: 7582-7019

AuthorID (RSCI): 474040

AuthorID (SCOPUS): 13406046300

ORCID: 0000-0003-0797-875X

Correspondence address: margarita-chizhik@rambler.ru

SHEVELEVA Inna Aleksandrovna, Senior Lecturer of the Costume Design Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2224-1971

AuthorID (RSCI): 716314

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

The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 17.10.2025.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КИНЕМАТИКИ ШТОКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РЫЧАЖНОГО МАНИПУЛЯТОРА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ

А. Х. Шамутдинов¹, И. Ю. Лесняк²

¹Омский автобронетанковый инженерный институт,
Россия, 644098, г. Омск, ул. 14-й Военный Городок, 119

²Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Данное исследование затрагивает анализ кинематики верхнего конца штока гидроцилиндра (пневмоцилиндра, шарико-винтовой пары и др. двигателей поступательного движения), входящего в состав схемного решения рычажного манипулятора, конец ведущего штока которого перемещается по заданной прямолинейной направляющей.

Определены аналитические зависимости аналогов угловых скоростей и угловых ускорений штоков механизма, в программе Mathcad 15 представлены графики этих зависимостей для частного случая при заданном горизонтальном расположении прямолинейной направляющей, проанализированы их соотношения. Предложена методика расчёта кинематики рассматриваемого рычажного манипулятора графическим методом: на основе безразмерного коэффициента изменения угловых скоростей K_ω (отношение площадей треугольников), определяются угловые скорости и ускорения ведомых штоков механизма, на основе его геометрических параметров и заданной линейной скорости ведущего штока, что значительно снижает время расчета его кинематики в технологическом процессе эксплуатации механизма.

Ключевые слова: рычажный манипулятор, двигатель поступательного движения, гидро- пневмоцилиндр, шарико-винтовая пара, спрямляющий механизм, обобщённая координата, скорость.

Для цитирования: Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю. Методика расчёта кинематики штока двигателя поступательного движения рычажного манипулятора, движущегося в прямолинейной направляющей // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 18–25. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-18-25. EDN: YCROCX.



© Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE KINEMATICS OF THE PISTON ROD OF A TRANSLATIONAL MOTION ENGINE OF A LEVER MANIPULATOR MOVING IN A RECTILINEAR GUIDE

A. Kh. Shamutdinov¹, I. Yu. Lesnyak²

¹Omsk Tank-Automotive Engineering Institute, Russia, Omsk, 14th Voyennyy gorodok St., 119, 644098

²Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article deals with the analysis of the kinematics of the upper end of the hydraulic cylinder rod (pneumatic cylinder, ball screw pair, etc.), which is part of the circuit solution of a lever manipulator, the end of the leading rod of which moves along a given rectilinear guide. Analytical dependencies of the analogs of angular velocities and angular accelerations of the mechanism rods are determined. A technique for determining the kinematic characteristics of the considered lever manipulator using a graphical method is developed. Using a dimensionless coefficient of change in angular velocities (the ratio of the areas of triangles), angular velocities and accelerations of the driven rods of the mechanism are determined based on its geometric parameters and a given linear velocity of the leading rod, which significantly reduces the time of calculating its kinematics in the technological process of operating the mechanism.

Keywords: lever manipulator, translational motion engine, hydraulic-pneumatic cylinder, ball screw pair, straightening mechanism, generalized coordinate, speed.



Введение

Рычажный манипулятор представляет собой механизм, в частности робот-манипулятор, содержащий систему звеньев, предназначенную для управления исполнительными объектами мобильной платформы. Здесь мы будем рассматривать не конкретный механизм, а схемное решение рычажного механизма-манипулятора, в котором задана структурная схема, описано расположение и исполнительные звеньев. Именно на мобильной платформе находятся объекты (механизмы) для их исполнительного управления. Управление рычажным механизмом (манипулятором) осуществляется за счёт придания определенным, а именно ведущим звеньям начальных движений. Данное исследование, для простоты, будет касаться плоского рычажного механизма. Из структурной теории механизмов Ассура – Артоболевского известно, что подвижность плоского механизма определяется формулой П. Л. Чебышева [1, с. 40]

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad (1)$$

где n — число подвижных звеньев; p_4 , p_5 — количество кинематических пар 4-го и 5-го классов.

Указанные механизмы нашли широкое применение в машиностроении: в роботостроении, судостроении, специальной военной технике и др. В каждом конкретном случае необходимо определение кинематических характеристик (линейных и угловых скоростей и ускорений). Например, в транспортной технике известны крано-манипуляторные установки для выполнения погрузочно-разгрузочных работ, где необходимо знание координат положения объекта, а также размеров его рабочей зоны [2, 3]; в медицине [4]; в автоматических линиях сборки [5] и т. д.

Как известно, наиболее актуальной задачей современного машиностроения является увеличение степени подвижности механизма W , повышение его кинематической мобильности и эксплуатационных возможностей [6]. Как видно их формулы [1], повышение подвижности можно осуществить за счёт увеличения числа подвижных звеньев и уменьшения в нём избыточных связей. Из [7, 8] известно, что для увеличения различных вариантов применения технологического оборудования в машиностроении широко используют механизмы-манипуляторы с широкой системой приводов (ведущих штоков), общее действие которых позволяет реализовать почти любое заданное движение рабочего органа в заданной (плоской или пространственной) рабочей зоне.

Классическая задача исследования направляющих механизмов была установлена ещё Д. Уаттом для передачи прямолинейного движения конца поршневого штока концу коромысла, движущегося по дуге окружности [9]. Во многих направляющих (спрямляющих) механизмах П. Л. Чебышева, Хойкена, Липкина – Поссеа и др. [10], кинематические исследования которых достаточно известны и

реализованы во многих областях машиностроения, конец коромысла-шатунa перемещался по *направляющей окружности*.

Предлагается исследование рычажного механизма-манипулятора, у которого направляющая движения выходного звена — штока гидроцилиндра, задана в виде *прямой линии*. Такие механизмы получили широкое применение в конструкциях экскаваторов, кранов, гидropодъемников, а также в тех механизмах, в которых необходимо получение выстоя выходного звена, то есть его остановки на определенный промежуток времени [11, 12]. Считаем, что схемное решение рычажного механизма (манипулятора) известно, определено и описана его работа. Задача сводится к определению условий работы исследуемого рычажного механизма, в данном случае кинематических, когда известны парциальные движения его ведущих звеньев.

Постановка задачи

Задано схемное решение рычажного механизма-манипулятора с заданной прямолинейной направляющей конца приводного штока — точки B (рис. 1). Известна его структурная схема и основные его геометрические размеры. Направляющая задана в общем виде — наклонная прямая BB_1 , расположенная под углом γ к горизонту. Известна величина выдвигания правого, ведущего штока, поступательная скорость этого выдвигания и его ускорение (при равномерном выдвигании штока — оно равно нулю). Задача — описать методику определения угловых скоростей и ускорений поворотов ведомого (левого) штока гидроцилиндра (пневмоцилиндр, шарико-винтовая пара (ШВП), в общем случае, двигателя поступательного движения (ДПД)) на основе графического метода.

Теория

В работах [13–15] рассматривалась схема манипулятора, где для увеличения угла поворота стрелы в горизонтальной плоскости без общих перемещений самого погрузчика был введен дополнительный двигатель поступательного движения (гидроцилиндр). Для расширения кинематических и динамических возможностей данного манипулятора и расширенной рабочей зоной предлагалось управление исполнительными приводами задавать по определенным программным движениям.

На основе принципа действия рассматриваемых конструкций механизмов работа исследуемого рычажного манипулятора (рис. 1) состоит в следующем: при увеличении длины правого штока l_1 его длина увеличивается на величину s_1 и поворачивается на угол ψ . При этом точка B движется по заданной фиксированной направляющей — наклонной прямой BB_1 , то есть доходит до точки B_1 , а левый шток b_1 повернется на угол ϕ , при этом его длина укоротится на величину s_2 . На рис. 1 наклонная прямая BB_1 представляет собой *направляющую* прямую, по которой движется точка B — конец правого штока ведущего штока ДПД; a — расстоя-

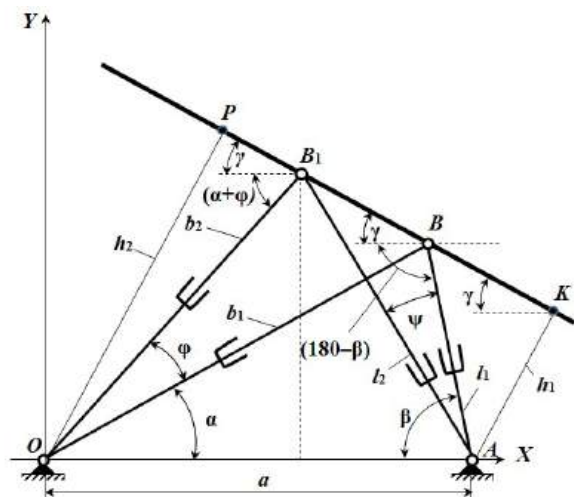


Рис. 1. Схемное решение рычажного механизма (манипулятора) с наклонной прямолинейной направляющей
Fig. 1. Schematic diagram of a lever mechanism (manipulator) with an inclined straight-line guide

ние между нижними опорами ведомого и ведущего штоков.

Предполагается, что штоки l_1 и b_1 своими концами (кинематическими парами) соединены с мобильной платформой отдельно, но расстояние между шарнирными соединениями намного меньше их размеров.

Выведем уравнение заданной направляющей — прямой BB_1 , — где точка $B(x_1, y_1)$ — в начале и $B_1(x_2, y_2)$ — в конце её движения по направляющей. Введём систему координат OXY : начало координат — точка O — это нижний шарнир ведомого штока b_1 ; ось OX направлена вдоль линии соединения шарниров O и A (нижний шарнир ведущего штока l_1). Уравнение прямой, проходящей через две точки (прямая BB_1), будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}. \quad (2)$$

Из рис. 1 видно, что в этом уравнении:

$$\begin{aligned} x_1 &= b_1 \cos \alpha, \quad x_2 = b_2 \cos(\alpha + \phi); \\ y_1 &= b_1 \sin \alpha, \quad y_2 = b_2 \sin(\alpha + \phi), \end{aligned}$$

где ϕ — угол между начальным и конечным положениями ведомого штока b_1 ; α — угол начального положения ведомого штока b_1 .

Подставим эти координаты в (2) и выполним преобразования. Получим:

$$\begin{aligned} y &= \frac{b_2 \sin(\alpha + \phi) - b_1 \sin \alpha}{b_2 \cos(\alpha + \phi) - b_1 \cos \alpha} \cdot x - \\ &\quad - \frac{b_1 b_2 \sin \phi}{b_2 \cos(\alpha + \phi) - b_1 \cos \alpha} \end{aligned}$$

или

$$y = k \cdot x - p, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{b_2 \sin(\alpha + \phi) - b_1 \sin \alpha}{b_2 \cos(\alpha + \phi) - b_1 \cos \alpha} = \operatorname{tg} \gamma; \quad (4)$$

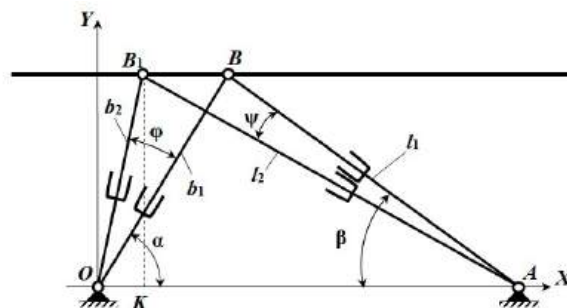


Рис. 2. Схемное решение рычажного механизма (манипулятора) с горизонтальной прямолинейной направляющей
Fig. 2. Schematic diagram of a lever mechanism (manipulator) with a horizontal straight-line guide

$$p = \frac{b_1 b_2 \sin \phi}{b_2 \cos(\alpha + \phi) - b_1 \cos \alpha}. \quad (5)$$

Уравнение (3) представляет собой уравнение наклонной прямой BB_1 , где угол γ — угол наклона прямой BB_1 с осью X .

При $k = 0$ выражение (4) будет

$$\begin{aligned} k &= \frac{b_2 \sin(\alpha + \phi) - b_1 \sin \alpha}{b_2 \cos(\alpha + \phi) - b_1 \cos \alpha} = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow b_2 \sin(\alpha + \phi) - b_1 \sin \alpha = 0, \end{aligned}$$

откуда $b_1 \sin \alpha = b_2 \sin(\alpha + \phi) \Rightarrow \frac{b_1}{\sin(\alpha + \phi)} = \frac{b_2}{\sin \alpha}$. Углы BOA и OB_1B равны, когда направляющая BB_1 параллельна оси OX и последнее выражение представляет собой теорему синусов для $\triangle OB_1B$ на рис. 2 и уравнение (3) будет выглядеть как $y = \frac{b_1 b_2 \sin \phi}{b_2 \cos(\alpha + \phi) - b_1 \cos \alpha}$ — уравнение горизонтальной прямой BB_1 , что соответствует теореме о параллельных и секущих (рис. 2).

При $y = 0$ выражение (3) принимает вид $y = k \cdot x - p = 0$, откуда $x = \frac{p}{k}$ или $x = \frac{b_1 b_2 \sin \phi}{b_2 \sin(\alpha + \phi) - b_1 \sin \alpha}$ — уравнение вертикальной прямой BB_1 , что также соответствует теореме о параллельных и секущих, где углы B_1OA и OB_1B равны, когда направляющая BB_1 параллельна оси OY (рис. 3).

Уравнение (3) представляет собой общий вид вариантов на рис. 2 и рис. 3, которые являются частными случаями так называемых направляющих (спрямляющих) механизмов [10].

Из геометрических соображений найдём углы: $\angle ABB_1 = \gamma + (180^\circ - \beta) = 180^\circ - (\beta - \gamma)$, $\angle BB_1A = 180^\circ - (180^\circ - \beta + \gamma) - \psi = (\beta - \gamma - \psi)$, где $\angle BAB_1 = \psi$ — угол между начальным и конечным положениями ведущего штока l_1 .

Из треугольников $\triangle AB_1B$ и $\triangle OB_1B$ по теореме синусов находим:

$$\frac{l_1}{\sin(\beta - \gamma - \psi)} = \frac{l_2}{\sin(\beta - \gamma)} = \frac{BB_1}{\sin \psi}; \quad (6)$$

$$\frac{b_1}{\sin(\alpha + \gamma + \phi)} = \frac{b_2}{\sin(\alpha + \gamma)} = \frac{BB_1}{\sin \phi}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) соответствуют общему случаю (наклонного) расположения направляющей BB_1 ,

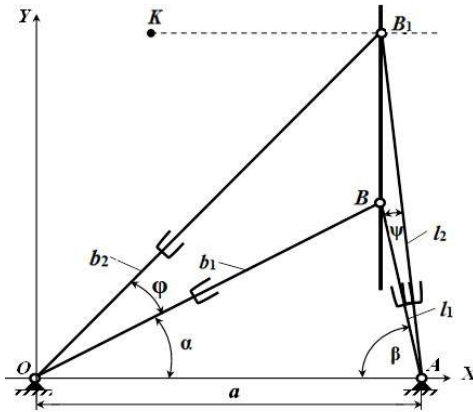


Рис. 3. Схемное решение рычажного механизма (манипулятора) с вертикальной прямолинейной направляющей
Fig. 3. Schematic diagram of a lever mechanism (manipulator) with a vertical straight-line guide

а не только случаям вертикального или горизонтального расположения направляющей BB_1 .

Для простоты будем считать, что $V_1 = \text{const}$ — линейная скорость выдвижения приводного штока l_1 величина заданная, и тогда величина перемещения штока будет выражаться $s_1 = V_1 t$; $V_2 = \text{const}$ — линейная скорость задвижения ведомого штока b_1 , и тогда величина перемещения штока будет выражаться $s_2 = V_2 t$.

Выполним преобразования (6), используя формулы тригонометрии, и получим:

$$\psi = (\beta - \gamma) - \arcsin\left(\frac{C \cdot l_1}{(l_1 + V_1 \cdot t)}\right), \quad (8)$$

где $C = \sin(\beta - \gamma) = \text{const}$; углы α и β постоянны, и тогда их скорости и ускорения равны нулю — $\dot{\alpha} = \dot{\beta} = \ddot{\alpha} = \ddot{\beta} = 0$.

При выводе уравнений скоростей и ускорений рассматривается отклонение механизма от начального положения с начальными углами α и β и начальной длиной l_1 штока AB.

Продифференцируем (8) по времени и получим:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} = \dot{\psi} &= \frac{d}{dt} \left[(\beta - \gamma) - \arcsin\left(\frac{C \cdot l_1}{(l_1 + s_1)}\right) \right] = \\ &= - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{C \cdot l_1}{(l_1 + s_1)}\right)^2}} \cdot (-1) \cdot C \cdot l_1 \cdot (l_1 + s_1)^{-2} \cdot \dot{s}_1; \\ \dot{\psi} = \omega_\psi &= \frac{C \cdot l_1 \cdot V_1}{(l_1 + V_1 \cdot t) \sqrt{(l_1 + V_1 \cdot t)^2 - C^2 \cdot l_1^2}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где ω_ψ — аналог угловой скорости поворота приводного штока l_1 , позволяющий определить изменение по времени угловой скорости поворота приводного штока l_1 в зависимости от скорости и геометрических параметров механизма, а также выявить её связи с угловой скоростью ведомого штока b_1 ; $V_1 = \dot{s}_1$ — скорость выдвижения приводного штока l_1 .

Из рис. 1 (треугольников $\triangle AB_1B$ и $\triangle OB_1B$) имеем $BB_1^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \psi$, $BB_1^2 = b_1^2 + b_2^2 - 2b_1 \cdot b_2 \cdot \cos \varphi$. Найдём конечный

предел при дифференцировании этих двух выражений для BB_1^2 :

$$\begin{aligned} \frac{d(BB_1^2)}{dt} &= \frac{d(l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 \cdot l_2 \cdot \cos \psi)}{dt} = \\ &= 2l_2 \frac{dl_2}{dt} - 2l_1 \frac{dl_2}{dt} \cos \psi + 2l_1 \cdot l_2 \cdot \sin \psi \cdot \frac{d\psi}{dt}, \\ \frac{d(BB_1^2)}{dt} &= \frac{d(b_1^2 + b_2^2 - 2b_1 \cdot b_2 \cdot \cos \varphi)}{dt} = \\ &= 2b_2 \frac{db_2}{dt} - 2b_1 \frac{db_2}{dt} \cos \varphi + 2b_1 \cdot b_2 \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt}. \\ 2l_2 \frac{dl_2}{dt} - 2l_1 \frac{dl_2}{dt} \cos \psi + l_1 \cdot l_2 \cdot \sin \psi \cdot \dot{\psi} &= \\ = 2b_2 \frac{db_2}{dt} - 2b_1 \frac{db_2}{dt} \cos \varphi + b_1 \cdot b_2 \cdot \sin \varphi \cdot \dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (10)$$

По теореме косинусов из $\triangle OAB$ получаем:

$$b_1 = \sqrt{a^2 + l_1^2 - 2a \cdot l_1 \cdot \cos \beta} = \text{const},$$

из $\triangle OAB_1$ получаем $b_2^2 = a^2 + (l_2(t))^2 - 2a \cdot l_2(t) \cdot \cos(\beta - \psi(t))$.

После дифференцирования и преобразований:

$$\frac{db_2}{dt} = \frac{1}{b_2} \left[l_2 \frac{dl_2}{dt} - a \frac{dl_2}{dt} \cos(\beta - \psi(t)) + a l_2(t) \sin(\beta - \psi(t)) \frac{d\psi}{dt} \right].$$

Из формулы (7) по аналогии имеем

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{A \cdot b_1}{(b_1 - V_2 \cdot t)}\right) - (\alpha + \gamma), \quad (11)$$

где $b_2 = b_1 - s_2 = b_1 - V_2 t$.

Также, дифференцируя (11), находим:

$$\dot{\varphi} = \omega_\varphi = \frac{A \cdot b_1 \cdot V_2}{(b_1 - V_2 \cdot t) \sqrt{(b_1 - V_2 \cdot t)^2 - A^2 \cdot b_1^2}}, \quad (12)$$

где $V_2 = f(V_1)$.

Из геометрии площадей S для треугольников $\triangle AB_1B$ и $\triangle OB_1B$ можно записать:

$$\begin{aligned} S_{\triangle OB_1B} &= \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot \sin \varphi — \\ &\text{площадь треугольника } \triangle OB_1B; \\ S_{\triangle AB_1B} &= \frac{1}{2} \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \sin \psi — \\ &\text{площадь треугольника } \triangle AB_1B. \end{aligned}$$

Из (6) и (7) для треугольников $\triangle OPB$ и $\triangle ABK$ (рис. 1) имеем

$$\frac{S_{\triangle OB_1B}}{S_{\triangle AB_1B}} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{b_1 \cdot \sin(\alpha + \gamma)}{l_1 \cdot \sin(\beta - \gamma)} = \frac{b_1 \cdot A}{l_1 \cdot C},$$

где $A = \sin(\alpha + \gamma)$.

Обозначим отношение аналогов угловых скоростей поворотов ведомого и ведущего штоков как коэффициент изменения их угловых скоростей K_ω . Разделим (12) на (9) и получим:

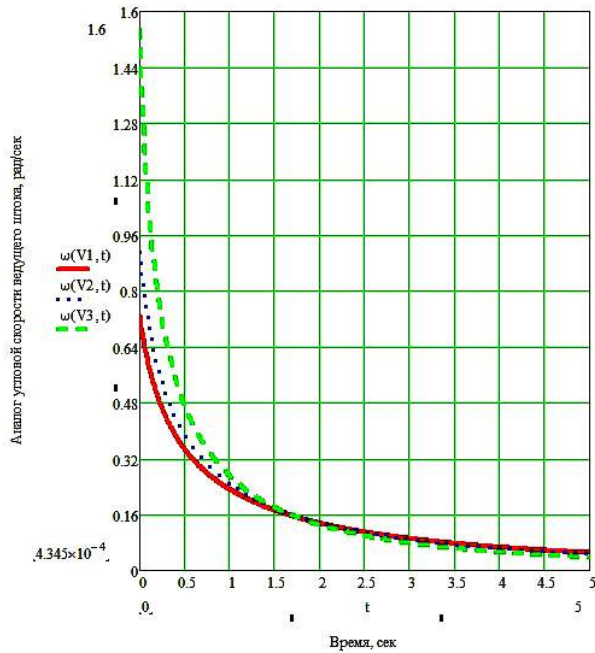


Рис. 4. Зависимость аналога угловой скорости ведущего штока ω_ψ от времени и скорости его выдвижения $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ м/с при прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (формула 9)
Fig. 4. Dependence of the angular velocity analog of the drive rod ω_ψ on time and its extension speed $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ m/s for a straight-line guide ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (equation 9)

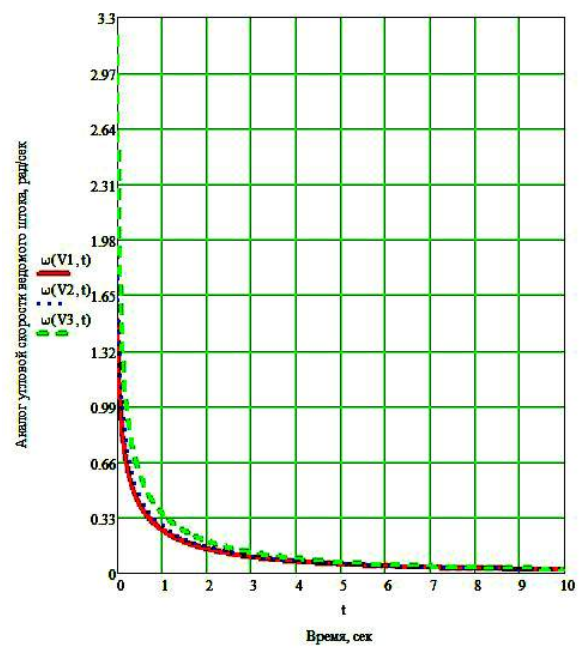


Рис. 5. Зависимость аналога угловой скорости ведомого штока ω_ϕ от времени и скорости его выдвижения $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ м/с при прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (формула 12)
Fig. 5. Dependence of the angular velocity analog of the driven rod ω_ϕ on time and the speed of its extension $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ m/s for a straight-line guide ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (equation 12)

$$\frac{\dot{\phi}}{\dot{\psi}} = \frac{\frac{A \cdot b_1 \cdot V_2}{(b_1 - V_2 \cdot t) \sqrt{(b_1 - V_2 \cdot t)^2 - A^2 \cdot b_1^2}}}{\frac{C \cdot l_1 \cdot V_1}{(l_1 + V_1 \cdot t) \sqrt{(l_1 + V_1 \cdot t)^2 - C^2 \cdot l_1^2}}} = \frac{A \cdot b_1 \cdot V_2 \cdot ((l_1 + V_1 \cdot t) \sqrt{(l_1 + V_1 \cdot t)^2 - C^2 \cdot l_1^2})}{C \cdot l_1 \cdot V_1 \cdot ((b_1 - V_2 \cdot t) \sqrt{(b_1 - V_2 \cdot t)^2 - A^2 \cdot b_1^2})} = K_\omega. \quad (13)$$

Формула (13) представляет собой коэффициент изменения угловых скоростей поворотов ведомого и ведущего штоков в общем виде.

Рассматривая частный случай, когда направляющая расположена горизонтально ($\gamma = 0^\circ$), можно записать

$$\frac{b_1 \cdot A}{l_1 \cdot C} = 1,$$

и тогда $K_\omega = \frac{V_2 \cdot (l_1 + V_1 \cdot t)}{V_1 \cdot (b_1 - V_2 \cdot t)} \cdot \frac{\sqrt{(l_1 + V_1 \cdot t)^2 - C^2 \cdot l_1^2}}{\sqrt{(b_1 - V_2 \cdot t)^2 - A^2 \cdot b_1^2}}.$

Из (6) и (7) имеем

$$\begin{aligned} \frac{l_2 \sin \psi}{\sin(\beta - \gamma)} &= \frac{b_2 \sin \phi}{\sin(\alpha + \gamma)} \Rightarrow \frac{l_2 \sin \psi}{C} = \frac{b_2 \sin \phi}{A} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{\sin \psi}{\sin \phi} = \frac{C \cdot b_2}{A \cdot l_2} \Rightarrow \frac{\sin \psi}{\sin \phi} = \frac{C \cdot (b_1 - s_2)}{A \cdot (l_1 + s_1)}, \end{aligned}$$

откуда $s_2 = b_1 - \frac{Al_1}{C} \cdot \left(\frac{\sin \psi}{\sin \phi} \right) - \frac{A}{C} \cdot \left(\frac{\sin \psi}{\sin \phi} \right) \cdot s_1$

или

$$V_2 = b_1 - \frac{Al_1}{C} \cdot \left(\frac{\sin \psi}{\sin \phi} \right) - \frac{A}{C} \cdot \left(\frac{\sin \psi}{\sin \phi} \right) \cdot V_1, \quad (14)$$

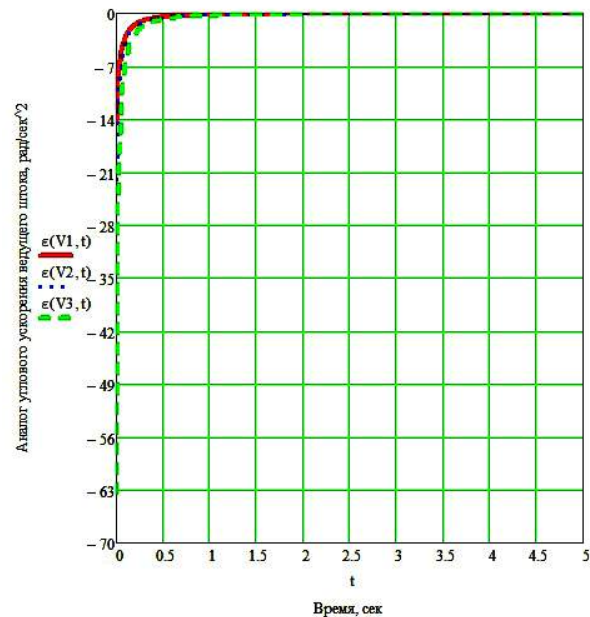


Рис. 6. Зависимость аналога углового ускорения ведущего штока ε_ψ от времени и скорости его выдвижения $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ м/с при прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (формула 15)

Fig. 6. Dependence of the angular acceleration analogue of the drive rod ε_ψ on the time and speed of its extension $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ m/s for a straight-line guide ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (equation 15)

где (14) — зависимость скорости перемещения ведомого штока b_2 от скорости перемещения ведущего штока l_1 , причём по (8) и (11): $\psi = f(V_1)$ и $\phi = f(V_1)$, и тогда $K_\omega = f(V_1)$.

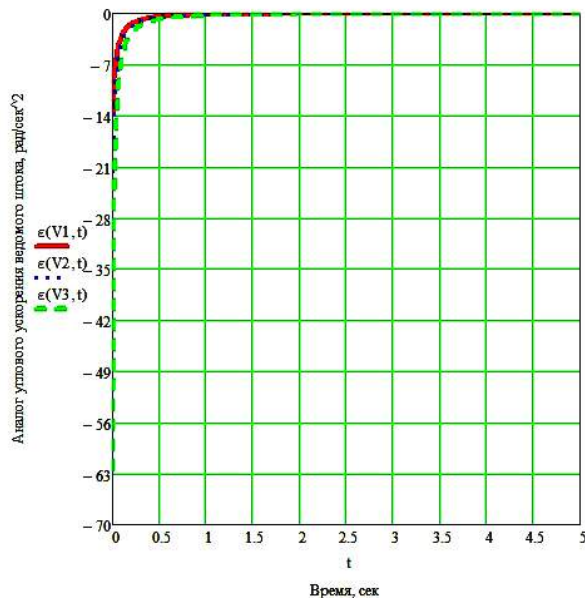


Рис. 7. Зависимость аналога углового ускорения ведомого штока ε_ϕ от времени и скорости его выдвижения $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ м/с при прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (формула 16)
Fig. 7. Dependence of the angular acceleration analog of the driven rod ε_ϕ on the time and speed of its extension $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ m/s for a straight-line guide ($\gamma = 0^\circ$), $\alpha = \beta = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$, $b_1 = \text{const}$ (equation 16)

Из рис. 2 видно, что $\frac{S_{\Delta O B_1 B}}{S_{\Delta A B_1 B}} = \frac{1}{K_\omega} \geq 1$ — отношение площадей треугольников, полученных при движении конца ведущего штока ДПД, ограниченных линиями начальных и конечных длин ведущего и ведомого штоков и прямой направляющей — обратно пропорционально коэффициенту изменения угловой скорости K_ω . Данное отношение площадей треугольников постоянно, а значит, коэффициент изменения угловой скорости K_ω постоянен при движении точки В на всём протяжении прямолинейной направляющей и зависит только от начальных параметров механизма — линейных размеров l_1 , b_1 и углов α , γ .

Применительно к механизму на рис. 2 видно, что $K_\omega = 1$, то есть из геометрических соотношений площади треугольников равны $S_{\Delta O B_1 B} = S_{\Delta A B_1 B}$ и изменения угловых скоростей поворота ведущего и ведомого штоков одинаковы.

Итак, за обобщённую координату движений ведущего и ведомого штоков манипулятора можно принять перемещение ведущего штока s_1 .

Соотношение (13) позволяет определить аналог угловой скорости (ускорения) ведомого штока ω_ϕ (ε_ϕ) заранее, имея значение аналога угловой скорости (ускорения) приводного штока ω_ψ и геометрические параметры механизма.

Найдём аналог ускорения поворота ведущего штока:

$$\ddot{\psi} = \varepsilon_\psi = \frac{C \cdot l_1}{l_2(t) \sqrt{l_2^2(t) - C^2 \cdot l_1^2}} \times \left[\left(\frac{dl_2}{dt} \right)^2 \cdot \frac{2l_2^2(t) - C^2 \cdot l_1^2}{l_2(t)} - \frac{d^2 l_2}{dt^2} \right]. \quad (15)$$

Аналогично, используя (12), находим аналог ускорения поворота ведомого штока:

$$\ddot{\phi} = \varepsilon_\phi = \frac{A \cdot b_1}{b_2(t) \sqrt{b_2^2(t) - A^2 \cdot b_1^2}} \times \left[\left(\frac{db_2}{dt} \right)^2 \cdot \frac{2b_2^2(t) - A^2 \cdot b_1^2}{b_2(t)} - \frac{d^2 b_2}{dt^2} \right]. \quad (16)$$

Используя пакет программы Mathcad 15, построим графики зависимостей (9), (12) — рис. 4–5, (15) и (16) — рис. 6–7 при $V_1 = (0,08; 0,1; 0,17)$ м/с для частного случая горизонтального расположения прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$).

Результаты исследования

1. Предложено понятие безразмерного коэффициента изменения угловой скорости для данного вида рычажных манипуляторов K_ω (13). Данный коэффициент позволяет определить аналог угловой скорости (ускорения) ведомого штока ω_ϕ (ε_ϕ) заранее, имея значение аналога угловой скорости приводного штока ω_ψ и геометрические параметры механизма, то есть графически определить кинематические параметры (аналоги угловой скорости и ускорения) ведомого штока по известным, заданным кинематическим параметрам ведущего штока. Рассмотрено два положения ведущего и ведомого штоков для более наглядного понимания процесса кинематики механизма и определения изменения длин штоков от углов их поворотов.

2. Найдены аналитические зависимости углов поворота ведущего штока (8) от обобщённой координаты $s_1 = V_1 \cdot t$, и по известному коэффициенту угловой скорости K_ω (13) найдены кинематические характеристики исследуемого механизма — аналоги угловых скоростей (9), (12) и ускорений поворотов ведущего и ведомого штоков механизма (15), (16).

3. Анализ коэффициента изменения угловой скорости поворотов ведущего и ведомого штоков для частного случая горизонтального расположения прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$) показывает, что угловая скорость ведущего штока ω_ψ больше, чем угловая скорость ведомого штока ω_ϕ . За обобщённую координату движений штоков механизма принято одно парциальное движение, а именно движение ведущего штока, что значительно облегчает проектирование и обслуживание механизма.

Заключение

Представлены аналитические зависимости аналогов угловых скоростей и угловых ускорений поворота ведущего и ведомого штоков исследуемого схемного решения механизма от перемещения приводного штока как обобщённой координаты. В программе Mathcad 15 представлены графики этих зависимостей для частного случая горизонтального расположения прямолинейной направляющей ($\gamma = 0^\circ$).

Научная новизна исследования заключается в разработке методики определения кинематических характеристик рассматриваемых видов рычажных механизмов на основе предложенного коэффициента изменения угловых скоростей K_ω (13) (в кинематической схеме механизма — это отношение площадей треугольников, полученных линиями ограничивающих начальные и конечные положения ведущего и ведомого штоков), геометрических параметров и заданной линейной скорости ведущего штока. Данная методика позволяет графически определить кинематические параметры (аналоги угловой скорости и ускорения) ведомого штока

по известным, заданным кинематическим параметрам ведущего штока, а также помогает значительно снизить время расчета его кинематических параметров в технологическом процессе при проектировании и эксплуатации механизма.

Кроме того, бесспорным фактом является то, что парциальным движением в данном виде механизмов является одно движение штока ведущего двигателя поступательного движения. Это значительно снижает энергозатраты по проектированию и обслуживанию механизма: снижается масса, снижаются инерционные нагрузки (инерциальные моменты поворотов штоков), упрощается технологический процесс сборки и др., что даёт возможность разрабатывать схемные решения новых механизмов, используемых в различных областях машиностроения.

В будущих исследованиях по разработанной методике планируется рассмотреть изменения кинематических параметров механизма в диапазоне от $\gamma > 0^\circ$ до $\gamma = 90^\circ$.

Список источников / References

1. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1988. 640 с.
Artobolevskiy I. I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. 4th ed., revised and supplemented. Moscow, 1988. 640 p. (In Russ.).
2. Минин В. В., Дмитриев В. А., Азаров В. А. Эффективность бортовых кранманипуляторных установок модульного типа // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. Ижевск: Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. С. 358–363. ISBN 978-5-7526-1007-3. EDN: MBLCGD.
3. Minin V. V., Dmitriev V. A., Azarov V. A. Effektivnost' bortovykh kranmanipulyatornykh ustanovok modul'nogo tipa [Efficiency of modular onboard crane-manipulator units]. *Avtomobilestroyeniye: Proyektirovaniye, Konstruirovaniye, Raschet i Tekhnologii Remonta i Proizvodstva*. Izhevsk, 2023. P. 358–363. ISBN 978-5-7526-1007-3. EDN: MBLCGD. (In Russ.).
4. Lofgren B., Wikander J. Kinematic control of redundant knuckle booms. *International Journal of Forest Engineering*. 2009. Vol. 20 (1). P. 22–30. DOI: 10.1080/14942119.2009.10702572.
5. Пат. 2757969 C1 Российская Федерация, МПК А 61 В 34/37, В 25 J 13/06. Устройство управления манипуляторами роботохирургического комплекса / Рыжов С. В., Шайдуллин Ф. Х., Антонов Д. А. № 2020142473; заявл. 22.12.2020; опубл. 25.10.2021. Бюл. № 30. EDN: XEDQVN.
6. Patent No. 2757969 C1 Russian Federation, IPC A 61 B 34/37, B 25 J 13/06. Ustroystvo upravleniya manipulyatorami robotokhirurgicheskogo kompleksa [Robotic surgical complex manipulator control device] / Ryzhov S. V., Shaydullin F. Kh., Antonov D. A. No. 2020142473 EDN: XEDQVN. (In Russ.).
7. Замятин В. К. Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения: справ. Москва: Машиностроение, 1995. 607 с. ISBN 5-217-02596-4.
8. Zamyatin V. K. Tekhnologiya i osnashcheniye sborochnogo proizvodstva mashinopriborostroyeniya: sprav. [Technology and equipment of assembly production of mechanical engineering: handbook]. Moscow, 1995. 607 p. ISBN 5-217-02596-4. (In Russ.).
9. Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю. Теоретическое исследование кинематических пар «тор с тором» // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-35-43. EDN: ARSNMN.
10. Shamutdinov A. Kh., Lesnyak I. Yu. Teoreticheskoye issledovaniye kinematcheskikh par «tor s torom» [Theoretical study of kinematic pairs "torus with torus" based on geometric kinematics]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-35-43. EDN: ARSNMN. (In Russ.).
11. Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. [и др.]. Манипуляционные системы роботов / под общ. ред. А. И. Корендясева. Москва: Машиностроение, 1989. 472 с. ISBN 5-217-00461-4.
12. Korendyasev A. I., Salamandra B. L., Tyves L. I. [et al.]. Manipulyatsionnyye sistemy robotov [Robotic manipulation systems] / ed. by A. I. Korendyasev. Moscow, 1989. 472 p. ISBN 5-217-00461-4. (In Russ.).
13. Глазунов В. А., Колискор А. Ш., Крайнев А. Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. Москва: Наука, 1991. 95 с. ISBN 5-02-006759-8.
14. Glazunov V. A., Koliskor A. Sh., Kraynev A. F. Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury [Spatial mechanisms of the parallel structure]. Moscow, 1991. 95 p. ISBN 5-02-006759-8. (In Russ.).
15. Каменский А. Джеймс Уатт. Его жизнь и научно-практическая деятельность: биографический очерк. Москва: Директ-Медиа, 2014. 100 с. ISBN 978-5-4475-1028-2.
16. Kamenskiy A. Dzheymys Uatt. Ego zhizn' i nauchno-prakticheskaya deyatel'nost': biograficheskiy ocherk [James Watt. His life and scientific and practical activity: a biographical sketch]. Moscow, 2014. 100 p. ISBN 978-5-4475-1028-2. (In Russ.).
17. Бурьян С. Н. «Парадоксальный» механизм П. Л. Чебышёва // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 536–551 DOI: 10.18500/1816-9791-2024-24-4-536-551. EDN: NZJSQK.
18. Burian S. N. "Paradoksal'nyy" mekhanizm P. L. Chebysheva [The "paradoxical" mechanism of P. L. Chebyshev]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika. Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2024. Vol. 24, Issue 4. P. 536–551 DOI: 10.18500/1816-9791-2024-24-4-536-551. EDN: NZJSQK. (In Russ.).
19. Пат. 2229641 C2 Российская Федерация, МПК F 16 H 21/00. Рычажный механизм с подвижным приводом / Дворников Л. Т., Вандышев А. В. № 2002116927/11; заявл. 24.06.2002; опубл. 27.05.2004, Бюл. № 15.
20. Patent No. 2229641 C2 Russian Federation, IPC F 16 H 21/00. Rychazhnyy mekhanizm s podvizhnym privodom [Lever mechanism with movable drive] / Dvornikov L. T., Vandyshv A. V. No. 2002116927/11. (In Russ.).
21. Пат. 2440525 C1 Российская Федерация, МПК F 16 H 21/00. Рычажный механизм с двойным приводом / Дворников Л. Т., Желтухин Д. В. № 2010134242/11; заявл. 16.08.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2.
22. Patent No. 2440525 C1 Russian Federation, IPC F 16 H 21/00. Rychazhnyy mekhanizm s dvoynym privodom [Lever mechanism with dual drive] / Dvornikov L. T., Zheltukhin D. V. No. 2010134242/11. (In Russ.).
23. Несмиянов И. А., Карева Н. В. Геометрический синтез механизма поворота стрелы манипулятора // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 12. Ч. 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/12/39830> (дата обращения: 03.04.2025).
24. Nesmiyanov I. A., Kareva N. V. Geometricheskii sintez mekhanizma povorota strely manipulyatora [Geometric synthesis mechanism pivoting range of the manipulator]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. Modern Scientific Researches and Innovations*. 2014. No. 12. Part 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/12/39830> (accessed: 03.04.2025). (In Russ.).
25. Несмиянов И. А., Воробьёва Н. С., Турыгин П. В. Кинематические особенности погрузчика с последовательным соединением гидроцилиндров в механизме поворота стрелы // Современная техника и технологии. 2012. № 6. URL: <http://technology.snauka.ru/2012/06/1157> (дата обращения: 03.04.2025).

Nesmiyanov I. A., Vorob'yeva N. S., Turygin P. V. Kinematicheskiye osobennosti pogruzchika s posledovatel'nyim soyedineniyem gidrotsilindrov v mekhanizme povorota strely [Kinematic features of a loader with a series connection of hydraulic cylinders in the boom rotation mechanism]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. Modern Scientific Researches and Innovations*. 2012. No. 6. URL: <http://technology.snauka.ru/2012/06/1157> (accessed: 03.04.2025). (In Russ.).

15. Хадашов М. Л., Несмиянов Л. И., Карева Н. В. Кинематический анализ механизма поворота стрелы погрузочного манипулятора // Современные научные исследования и инновации. 2020. № 7. EDN: MRPENW. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/07/92864> (дата обращения: 03.04.2025).

Khadashov M. L., Nesmiyanov L. I., Kareva N. V. Kinematicheskiy analiz mekhanizma povorota strely pogruzochnogo manipulyatora [Kinematic analysis of the boom rotation mechanism of the loading manipulator]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. Modern Scientific Researches and Innovations*. 2020. No. 7. EDN: MRPENW. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/07/92864> (accessed: 03.04.2025). (In Russ.).

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

SPIN-код: 4939-6254

AuthorID (РИНЦ): 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ResearcherID: HLH-7822-2023

Адрес для переписки: 1972id@list.ru

ЛЕСНЯК Иван Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Машиноведение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6114-0646

ORCID: 0000-0002-9481-5985

ResearcherID: E-6397-2014

Адрес для переписки: lesnyak.ivan@gmail.com

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

Статья поступила в редакцию 25.04.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025; принята к публикации 07.10.2025.

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

SPIN-code: 4939-6254

AuthorID (RSCI): 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ResearcherID: HLH-7822-2023

Correspondence address: 1972id@list.ru

LESNYAK Ivan Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Machine Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6114-0646

ORCID: 0000-0002-9481-5985

ResearcherID: E-6397-2014

Correspondence address: lesnyak.ivan@gmail.com

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

The article was submitted 25.04.2025; approved after reviewing 18.09.2025; accepted for publication 07.10.2025.

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ БАШНИ СОТОВОЙ СВЯЗИ

Ю. Д. Маркина

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65

Современные антенно-мачтовые сооружения, используемые для размещения оборудования беспроводной связи, характеризуются высокой чувствительностью к воздействию ветровой нагрузки. Геометрические особенности, форма и пространственное расположение антенн оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние несущих металлических конструкций.

В исследовании представлены результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи с учетом реального размещения антенн и различных направлений ветрового потока. Проведенный численный анализ показал, что применение ограниченного количества расчетных направлений ветровой нагрузки, основанных лишь на нормах СП 20.13330.2016, не обеспечивает необходимой точности расчета. Обоснована востребованность индивидуального подхода при выборе направлений воздействия и построении расчетных моделей с различной ориентацией конструкции относительно ветра. Полученные результаты актуальны при проектировании и реконструкции антенно-мачтовых сооружений, а также при их последующем дооборудовании.

Ключевые слова: антенно-мачтовые сооружения, ветровая нагрузка, решетчатые металлические конструкции, панельные антенны, цифровое моделирование, напряженно-деформированное состояние, аэродинамическое сопротивление, инженерный расчет.

Для цитирования: Маркина Ю. Д. Влияние расположения технологического оборудования на результаты расчета цифровой модели башни сотовой связи // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 26–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-26-34. EDN: UGRPYB.



© Маркина Ю. Д., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPACT OF THE LOCATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ON THE CALCULATION RESULTS OF THE DIGITAL CELL TOWER

Yu. D. Markina

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Russia, Nizhny Novgorod, Il'inskaya St., 68, 603000

Modern antenna-mast structures, used for housing wireless communication equipment, are characterized by high sensitivity to wind load effects. The geometric features, shape, and spatial arrangement of antennas significantly influence the stress-strain state of the load-bearing metal structures.

The study presents the calculation results of a digital model of a cell tower, taking into account the actual placement of antennas and various wind flow directions. The conducted numerical analysis shows that applying a limited number of wind load calculation directions, based solely on the norms of SP 20.13330.2016, does not provide the required calculation accuracy. The authors prove the necessity of an individual approach in selecting the directions of action and constructing computational models with varying structural orientations relative to the wind. The obtained results are relevant for the design and reconstruction of antenna-mast structures, as well as for their subsequent retrofitting.

Keywords: antenna-mast structures, wind load, lattice metal structures, panel antennas, digital modeling, stress-strain state, aerodynamic resistance, engineering calculation.



Введение

Развитие радиочастотных ресурсов, технологий беспроводной связи и повышение пропускной способности каналов передачи данных требует как внедрения нового высокотехнологичного оборудования, так и своевременной модернизации существующих систем связи. Обеспечение надёжности, дальности и устойчивого качества сигнала в современных условиях возможно лишь при комплексном совершенствовании технической инфраструктуры, включая опорные конструкции антенно-мачтовых сооружений (АМС).

В процессе развёртывания линий электропередачи, ретрансляционных систем телевидения, радиовещания, а также организации сетей мобильной и технологической связи, широкое распространение получили башенные металлоконструкции. Эти опоры, обладая относительной лёгкостью, технологичностью и гибкостью, характеризуются при этом низкими демпфирующими свойствами, что обуславливает их высокую чувствительность к ветровым нагрузкам. Особенно значительное влияние на напряжённо-деформированное состояние несущих элементов оказывает аэродинамическое воздействие ветра на размещённое антенное оборудование. Ветровая нагрузка, воспринимаемая конструкцией, напрямую зависит от геометрических характеристик и ориентации антенн, что требует всестороннего учёта при инженерных расчётах [1–4].

Парусность антенн, являющаяся одним из основных факторов, определяющих величину аэродинамической нагрузки, определяется не только их габаритными размерами, но и формой, конструктивным исполнением, углом атаки ветрового потока, а также коэффициентом аэродинамического сопротивления. Антенны с обтекаемой формой обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением по сравнению с плоскими конструкциями, что снижает их парусность и, соответственно, нагрузку на несущую часть мачты.

Следует отметить, что эксплуатируемые антенно-мачтовые сооружения подвергаются регулярному переоснащению, сопровождающемуся установкой дополнительного технологического оборудования. Такой процесс неизбежно приводит к увеличению эксплуатационных нагрузок, нередко приближая конструкцию к предельным значениям грузоподъёмности. При этом каждое вновь установленное устройство может оказывать существенное влияние на распределение внутренних усилий и напряжений в элементах несущего каркаса. В условиях наличия нескольких уровней установки оборудования конструкция оказывается под действием переменных по высоте и направлению ветровых потоков, создающих сложную схему нагружения [5–8].

Особую опасность для устойчивости сооружения представляет размещение антенн далеко за пределами центра тяжести мачты, что свойственно антеннам сотовой связи. Это приводит к значительному росту моментов сил, создающих

дополнительные изгибающие и крутильные напряжения. Пространственное распределение антенн и их взаимное расположение относительно направления основного ветрового потока обуславливают необходимость проведения точных аэродинамических расчётов, учитывающих как индивидуальные, так и интегральные характеристики оборудования. Неоднородность размещения антенн, их различная форма и ориентация способны радикально изменить ветровое воздействие, воспринимаемое конструкцией, и, как следствие, повлиять на её общее напряжённое состояние.

В условиях наращивания антенной нагрузки становится критически важным учитывать пространственную компоновку оборудования при проведении расчётных процедур. Однако в действующей нормативной документации, включая учебные пособия и методические рекомендации по проектированию АМС, отсутствуют какие-либо указания по учёту расположения антенн при выборе расчётных направлений ветровых нагрузок. Такой пробел в нормативной базе значительно затрудняет корректную инженерную оценку и может привести к занижению действительных расчётных усилий в элементах конструкции [9–12].

В статье представлены результаты численного моделирования АМС с учётом фактической конфигурации и пространственного расположения панельных антенн, а также обоснована необходимость включения параметров размещения технологических элементов в алгоритм выбора критических направлений нагружения, наряду с положениями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Объект и методы исследования

Объект исследования — металлическая башня сотовой связи высотой 73,575 м (рис. 1), расположенная в Московской области.

Основные характеристики конструктивного решения:

- вид решётчатой конструкции с 0,000 до +73,575 м — четырехгранная призма с подкосами на опорной раме;
- базовые размеры в плане 2,4×2,4 м;
- сечения поясов: с 0,000 до +11,900 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×13; с +11,900 до +23,800 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×14; с +23,800 до +35,700 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×13; с +35,700 до +59,370 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø114×5; с +59,370 и выше — горячедеформированные бесшовные трубы Ø102×5;
- сечения раскосов: с 0,000 до +11,900 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø76×10; с +11,900 до +73,575 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø54×4 по ГОСТу 8732–78;
- сечения распорок: с 0,000 до +73,575 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø57×4;
- конструкция подкосов и опорной рамы: 4 подкоса, крепление к стволу на отм. +9,520;



Рис. 1. Объект исследования
Fig. 1. Research object

Таблица 1. Перечень и ветровая нагрузка на антенны и радиомодули
Table 1. List and wind load on antennas and radio modules

Оборудование	Z , м	k	C_x	n , шт.	A_f , м ²	$n \cdot A_f$, м ²	F , кгс	$n \cdot F$, кгс
Установленное оборудование								
Панельная антенна HUAWEI ATR4518R2	73,00	1,798	1,4	3	0,60	1,80	49,72	149,16
Радиомодуль Huawei RRU	73,00	1,798	1,4	3	0,06	0,18	4,96	14,88
Радиомодуль Huawei RRU	73,00	1,798	1,4	6	0,12	0,72	9,91	59,46
Комбайнер	73,00	1,798	1,4	3	0,04	0,12	3,12	9,36
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м	72,50	1,794	1,4	1	0,28	0,28	23,29	23,29
Антенна PPC MiniLink Ø 1,2 м (2×ODU)	69,00	1,768	1,4	1	1,13	1,13	91,81	91,81
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м	69,00	1,768	1,4	2	0,28	0,56	22,95	45,90
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м (2×ODU)	69,00	1,768	1,4	3	0,28	0,84	22,95	68,85
Антенна PPC MiniLink Ø 0,6 м	65,50	1,741	1,4	1	0,28	0,28	22,61	22,61
Антенна PPC Nokia Ø 0,6 м	65,50	1,741	1,4	1	0,28	0,28	22,61	22,61
Антенна PPC Nokia Ø 0,6 м	60,00	1,700	1,4	1	0,28	0,28	22,08	22,08
Антенна PPC CERAGON Ø 0,3 м	48,00	1,580	1,4	1	0,07	0,07	5,13	5,13
Антенна PPC Nokia Ø 0,3 м	60,00	1,700	1,4	1	0,07	0,07	5,52	5,52
Панельная антенна HXPM6X3WW17180 65T2CV2	36,00	1,450	1,4	3	0,79	2,37	52,51	157,53
Радиомодуль NSN Triple	36,00	1,450	1,4	3	0,28	0,84	18,36	55,08
УАФП-02	36,00	1,450	1,4	3	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*
Абонентский трансивер	36,00	1,450	1,4	1	0,09	0,09	6,00	6,00
Планируемое к установке оборудование								
Панельная антенна MOBI MB4B-65-17DE-IN-43	73,00	1,798	1,4	3	0,53	1,59	43,67	131,01
Антенна PPC ERICSSON Ø 0,6 м	68,00	1,760	1,4	1	0,34	0,34	27,74	27,74
*полностью закрыт от ветра другим оборудованием. Суммарная наветренная площадь оборудования и трубостоек, размещенных и планируемых к размещению, принята к расчёту 11,43 м ² с учётом ориентации в плане и затенения. Z — высота расположения узла над поверхностью земли.								

в углах рамы на отм. 0,000; габаритные размеры рамы — 12×12 м; сечение подкосов с 0,000 до +9,520 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø219×10 по ГОСТу 8732–78; сечения рамы на 0,000 — горячедеформированные бесшовные трубы Ø133×10 и Ø168×10 по ГОСТу 8732–78.

Все нагрузки на конструкцию рассчитаны в соответствии с действующей нормативной литературой. Ветровая нагрузка от технологического оборудования рассчитывалась с учётом ориентации в плане и затенения. Расчетная ветровая узловaя нагрузка от каждой антенны определяется по формуле, полу-

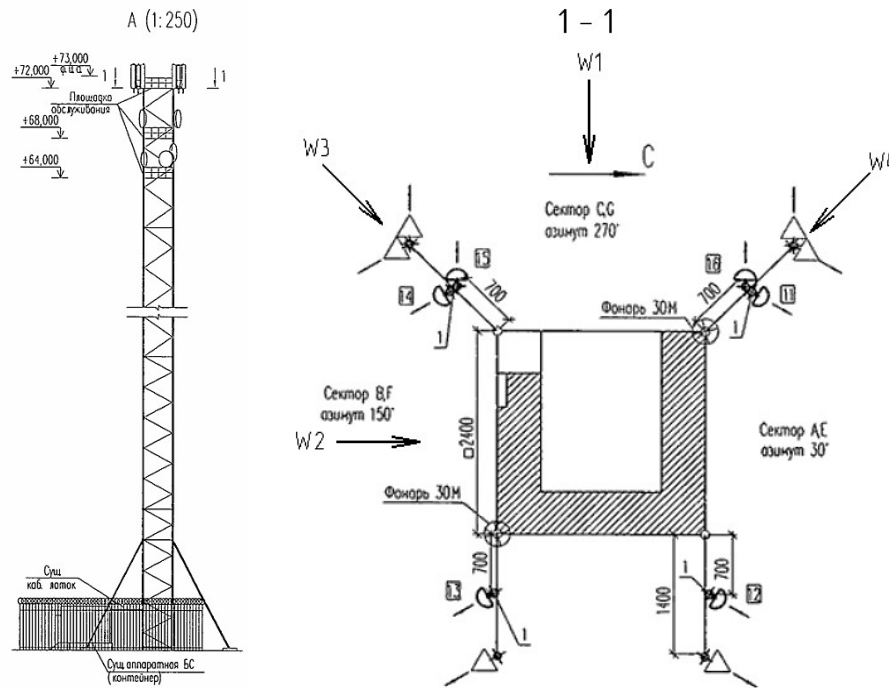


Рис. 2. Рассматриваемые направления атаки ветра
Fig. 2. Wind attack directions

ченной на основе формулы (11.2) СП 20.13330.2016 для средней ветровой нагрузки w_m , с последующим переходом к сосредоточенной силе через площадь элемента и с применением коэффициента надежности $\gamma_f = 1,4$:

$$F = \gamma_f \cdot w_0 \cdot k \cdot c_x \cdot A_i \quad (1)$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления, определяемое по табл. 11.1 СП 20.13330.2016; k — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, принимаемый по табл. 11.2 СП 20.13330.2016; c_x — аэродинамический коэффициент; A_i — наветренная площадь антенны.

Аэродинамический коэффициент лобового сопротивления $c_x = 1,4$ для всех типов антенного оборудования, независимо от его геометрической формы, конструктивного исполнения или назначения, в соответствии с Прил. В.1.13 свода правил СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», подлежит принятию в расчётах по нормативному значению, установленному для призматических сооружений и конструктивных элементов, а именно $c_x = 1,4$.

Данное значение рассматривается как универсальный нормативный показатель, применяемый в целях обеспечения достаточного запаса прочности и безопасности при проектировании несущих конструкций антенно-мачтовых сооружений. Однако многочисленные экспериментальные и численные теоретические исследования [13–16], посвящённые уточнению аэродинамических характеристик тел различной обтекаемой формы, демонстрируют, что для большинства современных приёмо-передающих антенн коэффициент аэродинамического сопротивления может быть существенно ниже. Это объясняется наличием конструктивных скруглений, изгибов и иных элементов, способствующих снижению турбулентности потока и, как следствие, уменьшению сопротивления воздуха при воздействии ветровой нагрузки.

Несмотря на полученные в научной среде данные, подтверждающие избыточность нормативного значения $c_x = 1,4$ для ряда типовых антенн, нормативно-методическая база РФ на текущем этапе развития требует применения именно этого значения в расчётах на ветровое воздействие. Следовательно, при расчёте несущей способности и оценке напряжённо-деформированного состояния конструкций антенно-мачтовых сооружений следует опираться исключительно на положения СП 20.13330.2016, что обеспечивает нормативную корректность и правоту расчётной модели.

Таким образом, в рамках данного исследования, несмотря на существующие основания для снижения расчетного значения аэродинамического коэффициента сопротивления с учетом реальной формы антенн и во избежание отклонений от требований нормативных документов, для всех рассматриваемых видов антенн был принят коэффициент $c_x = 1,4$. Это позволяет сохранить соответствие действующим строительным нормам и обеспечить достоверность полученных расчётных результатов при моделировании ветрового воздействия. Перечень антенн и радиомодулей, установленных и планируемых к установке на рассматриваемой опоре, а также сбор ветровой нагрузки на оборудование приведен в табл. 1.

Ветровая нагрузка на трубостойки, ограждения площадок и прочие конструкции задавалась отдельно на конечные элементы расчётной модели сосредоточенными силами в зависимости от профиля и высоты их расположения.

В соответствии с СП 20.13330.2016 аэродинамические коэффициенты пространственных ферм и решетчатых башен следует определять по формуле:

$$c_i = c_x \cdot (1 + \eta) \cdot k_i \quad (2)$$

где c_x и η определяются по Прил. В.1.15; в соответствии с таблицей В.9 значения коэффициента k_i

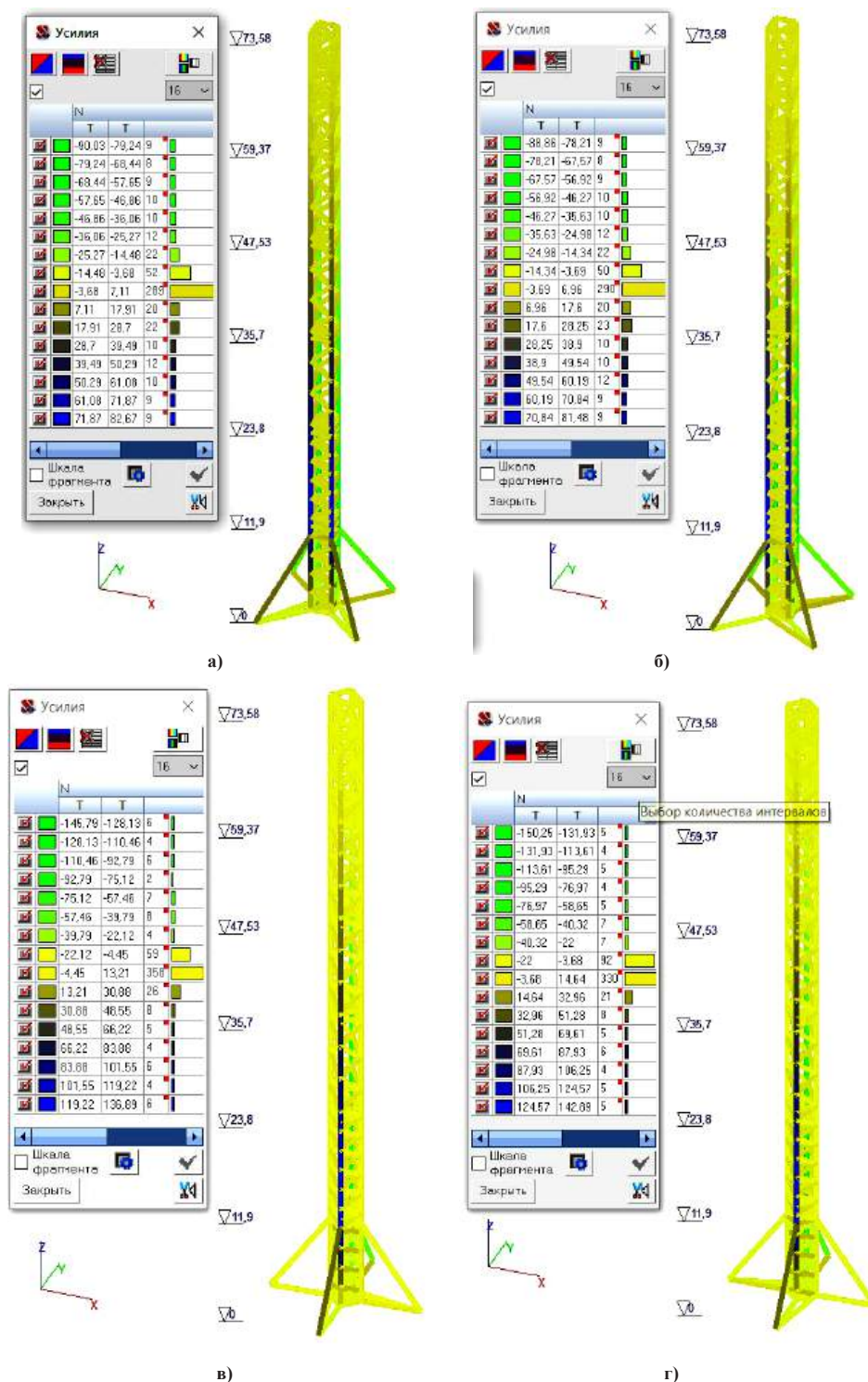


Рис. 3. Продольные усилия в элементах башни при направлении ветра:
а — W1; б — W2; в — W3; г — W4
Fig. 3. Longitudinal forces of the tower elements by the wind direction:
а — W1; б — W2; в — W3; г — W4

при направлении ветра в грань конструкции необходимо принимать равным 1, а при направлении ветра в ребро — 1,2.

Все расчёты проведены с использованием программного комплекса SCAD Office. Тип расчётной схемы — 5, тип конечного элемента — 5. Создано 230 узлов и 513 элементов, использовано 11 типов жесткости.

Результаты и обсуждения

По результатам анализа наиболее опасными направлениями атаки ветра являются показанные

на рис. 2 направления W1–W4. Значения коэффициента k_1 при направлении ветра W1 и W2 по СП 20.13330.2016 — 1, при направлении ветра W3 и W4 — 1,2.

Цветовая индикация значений продольных усилий в элементах башни по 16 интервалам при направлениях ветра W1–W4 представлена на рис. 3.

Распределение количества элементов конструкции, для которых определенное направление ветра (W1, W2, W3, W4) является расчётным, представлено на рис. 4. При ветровом воздействии в направлении W1 наибольшую нагрузку воспринимают именно



Рис. 4. Распределение количества элементов конструкции, для которых определенное направление ветра (W1, W2, W3, W4) является расчётным
 Fig. 4. Distribution of the number of structural elements for which a certain wind direction (W1, W2, W3, W4) is calculated

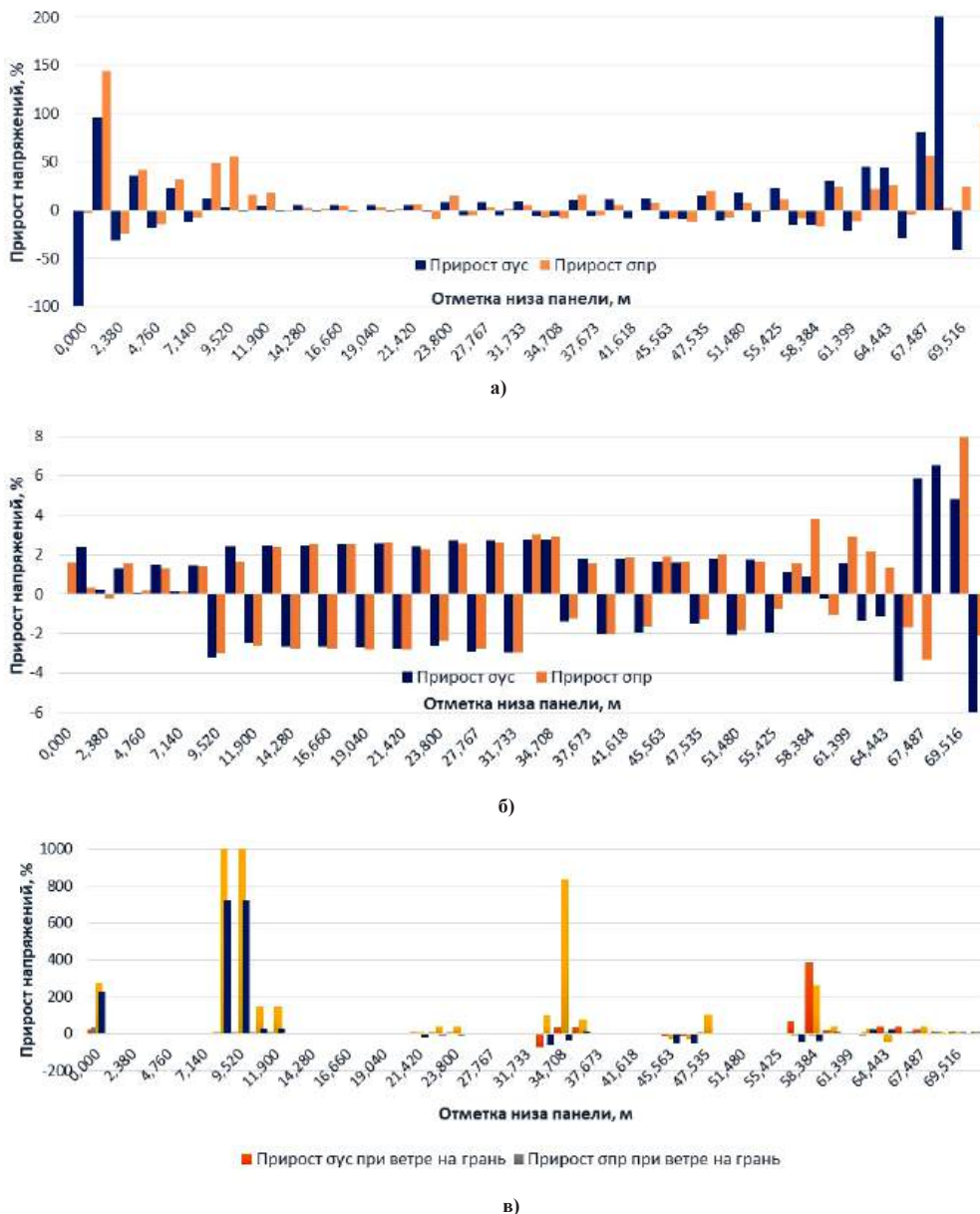




Рис. 6. Коэффициенты использования элементов конструкции
Fig. 6. Efficiency coefficients of structural elements

Результаты вычисления прироста максимальных напряжений при проверке на устойчивость σ_{yc} и прочность $\sigma_{пр}$ в элементах поясов при действии ветра в ребро; в элементах раскосов при действии ветра в ребро; в элементах распорок при действии ветра на грань и в ребро представлены на рис. 5. В процессе расчёта прироста сжимающих усилий в процентном соотношении в качестве базовых значений (100 %) использовались напряжения, полученные при наиболее опасных для конструкции направлениях ветра: на грань — W1, в ребро — W4. График, представленный на рис. 5а, показывает значительный разброс прироста напряжений элементов пояса в зависимости от высоты башни: с резким увеличением в нижней части конструкции (до 150 % и более) и в зоне отметки 69,5 м. Это свидетельствует о высокой чувствительности элементов поясов к направлению ветра W1. Приросты напряжений в элементах раскосов (рис. 5б) имеют умеренные значения (в пределах $\pm 10\%$), при этом наблюдается более равномерное распределение по высоте. Максимальные значения отмечаются в верхней трети конструкции (отметки от 61,9 до 69,5 м), что связано с направлением ветра на грань. Этот тип воздействия вызывает дополнительное изгибающее усилие в раскосах, однако характер изменения напряжений остается предсказуемым. Наиболее ярко выраженные пиковые приросты напряжений в распорках (рис. 5в) наблюдаются в зоне 9,5–11,9 м (до 100 %), а также на отметках 31,7 и 58,3 м. Эти участки демонстрируют аномальное поведение, предположительно, из-за неравномерного расположения оборудования.

На рис. 6 показан график коэффициентов использования элементов конструкции по типам (пояса, раскосы, распорки) в зависимости от высоты АМС. Коэффициент использования для некоторых элементов превышает 1. Наиболее критичные значения: на отметке 0,0 м — высокие значения для распорок (более 3,0); в диапазоне 9,52–11,9 м — как пояса, так и распорки работают с максимальными перегрузками (около 3,0); от 28 до 42 м — устойчивое превышение 1,0 у поясов. Требуется усиление элементов в нижней и средней частях конструкции.

Для всей конструкции наиболее опасными направлениями ветра являются на грань — W1, в ребро — W4. Такой вывод сделан на основании полученных максимальных значений продольных усилий и прироста напряжений в элементах, он

также подтверждается анализом перемещений конструкции. При действии ветра W1 в наибольшей степени нагружаются раскосы и распорки (рис. 3а, 4), что приводит к локальному росту напряжений, более чем на 150 % в нижней части башни (рис. 5б, 5в). При воздействии ветра W4 критически нагруженными оказываются пояса (рис. 3г, 4), для которых фиксируются значительный прирост напряжений и превышение коэффициента использования выше 1,0 в диапазоне высот от 9,52 до 47,6 м (рис. 5а, 6). Таким образом, именно направления W1 и W4 формируют наибольшие расчетные усилия и деформации в несущих элементах башни, что позволяет квалифицировать их как наиболее опасные для всей конструкции.

Анализ напряженно-деформированного состояния несущих конструкций металлической башни высотой 72 м по результатам расчета несущей способности опоры показал, что несущая способность металлоконструкций опоры не соответствует требованиям СП 16.13330.2017. Напряжения в элементах башни превышают значения расчетного сопротивления.

Инженерные расчёты в программных комплексах, таких как SCAD и их аналогах, требуют индивидуальной проверки несущей способности каждого элемента в рамках каждой из расчётных схем. Результаты при этом формируются отдельно для каждой конфигурации, что повышает трудоёмкость обработки данных и анализа результатов. Подбор сечений осуществляется по результатам каждой схемы в отдельности, что приводит к существенным затратам времени и ресурсов.

Дополнительную сложность представляет процесс задания даже одного варианта ветрового нагружения для высотной решётчатой конструкции. При увеличении количества нагружений до четырёх и более возрастает не только трудоёмкость подготовки исходных данных, но и длительность численного расчёта. Одним из возможных решений может быть применение нескольких различно ориентированных относительно ветровой нагрузки расчётных моделей вместо создания большого числа вариантов нагрузок в рамках одной схемы. Такой подход позволяет упростить этап задания нагрузок, однако значительно увеличивает количество вычислений и, как следствие, объём выходных данных, подлежащих анализу. Расчётная модель АМС может включать сотни и даже тысячи элементов. Для каждо-

го из них определяется полный набор внутренних усилий (обычно шесть компонентов), по которым осуществляется большое количество нормативных проверок в соответствии с действующими строительными нормами. В результате объём выходных данных может достигать чрезвычайно высоких значений, что требует от инженера высокой квалификации и автоматизации процессов анализа.

Заключение

Несмотря на то, что нормативная и учебная литература не регламентирует учет расположения технологического оборудования при выборе расчетных направлений ветра, для цифровой модели башни сотовой связи в процессе выбора расчетного направления ветра необходимо учитывать пространственное расположение всех элементов конструкции и оборудования. Простое рассмотрение воздействия ветра с одного-двух направлений в зависимости от контура поперечного сечения башни по СП 20.13330.2016 не обеспечивает необходимой полноты анализа. Решение о количестве и ориентации расчётных схем должно приниматься индивидуально на основании инженерного анализа. Важно учитывать как геометрию самой конструкции, так и пространственное размещение существующего и проектируемого оборудования. Индивидуальный подход к выбору схем нагружения является необходимым условием обеспечения надёжности и безопасности проектируемого объекта.

Благодарности / Acknowledgments

Автор выражает благодарность рецензенту, чья критическая оценка представленных материалов способствовала повышению качества статьи.

The author expresses gratitude to the reviewer whose critical assessment of the submitted materials significantly improved the quality of the article.

Список источников / References

- Белаш Т. А., Сафин Р. Р. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них // Вестник НИЦ «Строительство». 2024. № 41 (2). С. 18–28. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28. EDN: CQQMAP.
- Belash T. A., Safin R. R. Modelirovaniye vetrovoy nagruzki dlya analiza aerodinamiki opor dvoynogo naznacheniya s antennami, ustanovlennymi na nikh [Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo». Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024. No. 41 (2). P. 18–28. DOI: 10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28. EDN: CQQMAP. (In Russ.).
- Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-supporting telecommunication towers. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 18, no. 6. P. 911–927.
- Tsavidaridis K. D., Nicolaou A., Mistry A. D., Efthymiou E. Topology optimisation of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. *Structures*. 2020. Vol. 27. P. 2379–2399. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.08.010.
- Sabitov L. S., Mailyan L. R., Yaziev S. B. [et al.]. Stress-strain state of the "combined tower-reinforced-concrete foundation-foundation soil" system for high-rise structures. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. 02035. DOI: 10.1051/e3sconf/202016402035.
- Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R. N. Structural assessment of a lattice tower for a small multi-bladed wind turbine. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 8 (4). P. 343–358. DOI: 10.1007/s40095-017-0247-6.
- Zhang Q., Fu X., Lai T., Ren L. Wind load identification of lattice towers using multi-source heterogeneous monitoring data // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 236 (11). Article 105402. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105402.
- Hadane A., Redford J. A., Gueguin M. [et al.]. CFD wind tunnel investigation for wind loading on angle members in lattice tower structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 236 (11). 105397. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.105397.
- Liu M., Wu S., Guan W., Zhang C. [et al.]. Wind loads on square lattice towers with tubular members based on wind tunnel test and numerical simulation. *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36, no. 12. 127129. DOI: 10.1063/5.0243306.
- Маркина Ю. Д. Автоматизация сбора статической составляющей ветровой нагрузки на решетчатую башню // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2025. Т. 22, № 9. С. 23–30. DOI: 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030. EDN: UQDTZQ.
- Markina Yu. D. Avtomatizatsiya sbora staticheskoy sostavlyayushchey vetrovoy nagruzki na reshetchatuyu bashnyu [Automated collection of the static component of wind load on lattice towers]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. Herald of Computer and Information Technologies*. 2025. Vol. 22, no. 9. P. 23–30. DOI: 10.14489/vkit.2025.09.pp.023-030. EDN: UQDTZQ. (In Russ.).
- Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: Изд-во литературы по строительству, 1972. 111 с.
- Savitski, G. A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind loading on structures]. Moscow, 1972. 111 p. (In Russ.).
- Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко. Москва: Стройиздат, 1978. 216 с.
- Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystviye vetra [Guide to wind resistance analysis of buildings and structures] / TsNIISK imeni V. A. Kucherenko [CRIBS named after V. A. Kucherenko]. Moscow, 1978. 216 p. (In Russ.).
- Симиу Э., Сканлан Р. Воздействия ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б. Е. Маслова, А. В. Швецовой; под ред. Б. Е. Маслова. Москва: Стройиздат, 1984. 360 с.
- Simiu E., Scanlan R. Vozdeystviya vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind effects on structures] / trans. from Engl. B. E. Maslov, A. V. Shvetsova; ed. by B. E. Maslov. Moscow, 1984. 360 p. (In Russ.).
- Иоскевич А. В., Савченко А. В., Егорова Е. С., Иоскевич В. В. Понижающий коэффициент ветрового давления и его учет при расчете решетчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 45–57. EDN: UISIAF.
- Ioskevich A. V., Savchenko A. V., Egorova E. S., Ioskevich V. V. Ponizhayushchiy koeffitsiyent vetrovogo davleniya i ego uchet pri raschete reshetchatykh konstruksiy [The impact of the reduction factor of wind force coefficient to lattice structures]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. No. 4 (31). P. 45–57. EDN: UISIAF. (In Russ.).
- Gayatri G., Reddy B.T., Narender B. Comparative study of wind and ice loads on telecommunication towers in hilly terrain. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 455. 02021. DOI: 10.1051/e3sconf/202345502021.
- Трянина, Н. Ю., Облетов Е. Н., Самохвалов И. А. Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций // Приволжский научный журнал. 2022. № 1 (61). С. 23–30. EDN: NGWFXK.
- Tryanina, N. Yu., Obletov E. N., Samokhvalov I. A. Aerodinamicheskoye vozdeystviye na panel'nyye antenny bazovykh stantsiy [Aerodynamic impact on panel antennas of base stations]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. Privolzhsky Scientific Journal*. 2022. No. 1 (61). P. 23–30. EDN: NGWFXK. (In Russ.).

16. Jia Y., Huanget J., Liual Q. [et al.]. Analysis of the influence of antenna arrangement on the wind load of telecommunication towers. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (6). 2538. DOI: 10.3390/app14062538.

МАРКИНА Юлия Дмитриевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Теория сооружений и технической механики» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, г. Нижний Новгород.
SPIN-код: 4203-4240
AuthorID (РИНЦ): 1229730
ORCID: 0009-0006-7167-0652
Адрес для переписки: poluektoff@bk.ru

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

Статья поступила в редакцию 16.06.2025; одобрена после рецензирования 06.11.2025; принята к публикации 10.11.2025.

MARKINA Yuliya Dmitriyevna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Theory of Structures and Technical Mechanics Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod.
SPIN-code: 4203-4240
AuthorID (RSCI): 1229730
ORCID: 0009-0006-7167-0652
Correspondence address: poluektoff@bk.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 16.06.2025; approved after reviewing 06.11.2025; accepted for publication 10.11.2025.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

М. О. Шальнев, Я. В. Денисова

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68

В статье рассматривается применение на промышленных предприятиях цифровых инструментов в области бережливого производства, которое коренным образом меняет подход к развитию предприятий. Исследование охватывает основные концепции бережливого производства и их интеграцию с цифровыми технологиями в контексте «Индустрии 4.0». В работе приведены примеры основных цифровых инструментов бережливого производства, разработан процесс внедрения бережливой производственной системы с использованием цифровых инструментов в производственный процесс, проведено поэтапное описание процесса внедрения бережливой производственной системы с использованием цифровых инструментов, представлены примеры успешного применения цифровых инструментов, а также показано их влияние на эффективность производственных процессов и качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: цифровое бережливое производство, «Индустрия 4.0», цифровые инструменты, производственная система, промышленное предприятие, производственный процесс, операционная система.

Для цитирования: Шальнев М. О., Денисова Я. В. Применение цифровых инструментов в области бережливого производства на промышленных предприятиях // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 35–42. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-35-42. EDN: WHYNSQ.



© Шальнев М. О., Денисова Я. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF DIGITAL TOOLS IN THE SPHERE OF LEAN PRODUCTION AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

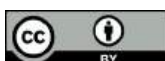
M. O. Shalnev, Ya. V. Denisova

Kazan National Research Technological University, Russia, Kazan, K. Marksa St., 68, 420015

The article examines the application of digital tools in the sphere of lean production in industrial enterprises, which fundamentally changes the approach to enterprise development. The study covers the basic concepts of lean manufacturing and their integration with digital technologies in the context of Industry 4.0. The paper provides examples of the main digital tools of lean manufacturing, develops a process for implementing a lean manufacturing system using digital tools into the production process, provides a step-by-step description of the process of implementing a BP system using digital tools, presents examples of successful application of digital tools, and shows their impact on the efficiency of production processes and the quality of manufactured products.

Keywords: digital lean manufacturing, Industry 4.0, digital tools, production system, industrial enterprise, production process, operating system.

For citation: Shalnev M. O., Denisova Ya. V. Application of digital tools in the sphere of lean production at industrial enterprises. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 35–42. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-35-42. EDN: WHYNSQ.



© Shalnev M. O., Denisova Ya. V., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью постоянного совершенствования производства, внедрения новейших технологий для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий. С этой целью на современных предприятиях используются также цифровые инструменты бережливого производства (БП), что способствует совершенствованию управления процессами производства продукции, нивелированию потерь и увеличению прибыли предприятий.

В условиях растущей конкуренции предприятия ищут новые подходы для повышения операционной эффективности, что делает применение концепции бережливого производства особенно важным.

Цель исследования

Цель данного исследования заключается в рассмотрении порядка внедрения бережливой производственной системы с использованием цифровых инструментов на промышленных предприятиях для совершенствования управления производственными процессами.

Основная часть

Ключевым фактором активного интереса к концепции «Бережливое производство» на промышленных предприятиях выступает понимание необходимости повышения конкурентоспособности каждого предприятия и, как следствие, создание эффективной и конкурентоспособной экономики в целом. В стратегии управления производством на сегодняшний день широко используется термин Lean («бережливый»). Данная стратегия включает такие концепции, как производство точно в срок (JIT — Just-in-Time Production), всеобщее управление качеством (TQM — Total Quality Management), Six Sigma (Шесть сигм), полное продуктивное обслуживание (TPM — Total Productive Maintenance), а также конкретные практики управления персоналом, например, командная работа и гибкая рабочая сила (HRM — Human Resource Management) [1].

За последние десятилетия различные методы и техники бережливого производства получили широкое распространение во многих странах, включая Россию. Для достижения цели (повышение эффективности работы предприятий) исследуются различные аспекты механизма увеличения производительности предприятий, определяются новые подходы как в планировании производственных процессов, так и в технологии их организации, включая цифровые решения; рассматриваются дополнительные резервы для роста; разрабатываются новые методы управления производительностью [2].

На сегодняшний день можно выделить 11 основных государственных стандартов в области бережливого производства. Краткая характеристика этих стандартов приводится в табл. 1.

Растущая конкуренция побуждает производственные компании искать способы и инструменты для повышения своей операционной эффективности, которая применительно к производству представляет собой комплексный показатель, отражающий оптимальное использование ресурсов (оборудования, материалов, трудовых затрат, времени и энергии) для выпуска максимального объема качественной продукции с минимальными издержками. Критически важными факторами при этом являются достижение минимально возможной себестоимости продукции при одновременном со-

кращении косвенных затрат, что в совокупности обеспечивает предприятию устойчивую рентабельность и конкурентные преимущества на рынке.

Достижение запланированного уровня операционной эффективности обеспечивается с помощью системного подхода, который начинается с изучения факторов внутренней и внешней среды организации и затем перетекает на анализ текущих процессов, в том числе через призму применения инструментов БП.

Точечные улучшения, осуществляемые отдельными подразделениями, не дают такого эффекта, как комплексная программа, объединяющая все оптимизационные инициативы предприятия, поэтому главная задача заключается в синхронизации всех мероприятий по повышению эффективности операционных процессов. Особое значение при этом имеет вовлечение персонала: сотрудники на всех уровнях управления должны четко видеть зоны неэффективности, обладать соответствующими полномочиями и практическими инструментами для реализации улучшений.

Значительное число российских компаний, не ограничиваясь только производственными отраслями, уже внедряют подходы бережливого производства в свою операционную деятельность [3].

Необходимость внедрения методов и инструментов бережливого производства в российскую промышленность определяется целью обеспечения её конкурентоспособности на мировом рынке. Среди отечественных предприятий первыми в этом плане стали крупные промышленные компании машиностроительной отрасли, такие как ПАО «КАМАЗ», ПАО «ГАЗ» и др. [4].

В основном такие предприятия используют практически одинаковые инструменты бережливого производства для повышения эффективности и уменьшения потерь в своих процессах, некоторые из которых приведены в табл. 2 [5]. В настоящее время происходит переход от третьей Промышленной революции к «Индустрии 4.0». Этот переход связан с заменой электронных и механических компонентов на цифровые аналоги. Расширяется спектр возможностей для совершенствования производственных процессов. Оптимизация производства позволяет повысить его эффективность за счет нивелирования потерь и увеличения прибыли.

Цифровая трансформация представляет собой фундаментальное переосмысление клиентского опыта, бизнес-моделей и операций. Для конечного потребителя и самого предприятия открываются дополнительные или новые перспективы развития. Инновационные технологии используются компаниями для улучшения качества выпускаемой продукции, увеличения прибыли и повышения эффективности работы в целом.

Начальный этап «Индустрии 4.0», на котором находится мир в настоящее время, характеризуется переходом на автоматизированное цифровое производство, управляемое «умными» системами и активно взаимодействующее с внешним контуром.

К основополагающим технологиям «Индустрии 4.0» можно отнести:

- интернет вещей, представляющий собой интеграцию физических объектов с интернетом, благодаря чему возможно получение о них необходимой информации через сбор и анализ данных, тестирование и т.д.;

- использование искусственного интеллекта для создания алгоритмов машинного обучения, по-

Таблица 1. Краткая характеристика стандартов серии «Бережливое производство»
Table 1. Brief description of compliance of the Lean Manufacturing series

Стандарт серии «Бережливое производство»	Описание
ГОСТ Р 56020 – 2020 «Бережливое производство. Основные положения и словарь»	В документе отражены основные положения концепции БП. Используется единая терминологическая база. В данном документе обобщается опыт работы российских предприятий
ГОСТ Р 56404 – 2021 «Бережливое производство. Требования к системам менеджмента» ГОСТ Р 56405 – 2015 «Бережливое производство. Процесс сертификации систем менеджмента. Процедура оценки» ГОСТ Р 56406 – 2021 «Бережливое производство. Аудит. Вопросы для оценки системы менеджмента»	Данные документы регламентируют мониторинг внедрения инструментов БП в производство, определяют процедуру оценки их эффективности
ГОСТ Р 56407 – 2015 «Бережливое производство. Основные методы и инструменты»	В данном ГОСТе дана развернутая характеристика методам и инструментам концепции бережливого производства, регламентирована техника их внедрения в производственные процессы
ГОСТ Р 56907 – 2016 «Бережливое производство. Визуализация»	Стандарт характеризует метод «Визуализация», отражает особенности его внедрения в производственные процессы, обосновывает эффективность его применения
ГОСТ Р 56906 – 2016 «Бережливое производство. Организация рабочего пространства (5S)»	Стандарт характеризует использование метода «5S» в производстве, отражает инструменты внедрения этого метода, обосновывает эффективность его применения
ГОСТ Р 56908 – 2016 «Бережливое производство. Стандартизация работы»	Документ характеризует метод «Стандартизация работы», устанавливает объекты для его использования, определяет инструменты осуществления этого метода, выявляет особенности процедуры его внедрения и функционирования
ГОСТ Р 57524 – 2017 «Бережливое производство. Поток создания ценности»	Данный стандарт определяет сущность понятий и положений производственных систем, которые созданы на базе концепции бережливого производства и на принципах процессного подхода
ГОСТ Р 57523 – 2017 «Бережливое производство. Руководство по системе подготовки персонала»	В документе представлены основные положения руководства персоналом с целью его обучения для внедрения концепции БП на производстве
ГОСТ Р 57522 – 2017 «Бережливое производство. Руководство по интегрированной системе менеджмента качества и бережливого производства»	Стандарт ориентирует руководителей и специалистов на создание интегрированной системы менеджмента качества и бережливого производства

Таблица 2. Инструменты бережливого производства
Table 2. Lean Manufacturing Tools

Инструмент	Описание
5S	Система организации рабочего пространства для повышения эффективности и порядка
Кайдзен	Философия непрерывного улучшения, основанная на регулярных небольших изменениях в процессах
Визуальное управление	Использование визуальных сигналов для упрощения восприятия состояния процессов и выявления проблем
Система «Тянущего» производства	Производство по фактическому спросу, что снижает запасы и предотвращает перепроизводство
Анализ потока создания ценности	Инструмент для выявления и устранения потерь в производственном процессе
Стандартизированная работа	Разработка стандартов для выполнения операций для повышения качества и уменьшения вариативности
Управление качеством на всех этапах (TQM)	Вовлечение всех сотрудников в процесс обеспечения качества на всех уровнях

звояющих автоматизировать производственные процессы, а также самостоятельно принимать решения в проблемных ситуациях;

— 3D-печать — производство объектов на основании цифровых моделей из множества слоев материала, последовательно наносимых друг на друга;

— блокчейн — децентрализованная система для хранения и передачи данных, обеспечивающая безопасность и неизменность информации;

— робототехника — внедрение в производство автоматизированных систем, роботов, способных выполнять набор стандартизированных действий;

— виртуальная и дополненная реальность — создание интерактивных сред для обучения, проектирования и производства;

— большие данные — совокупность данных, характеризующаяся высокой скоростью поступления, многообразием и большими объемами;

— облачные технологии — модель, обеспечивающая сетевой доступ к общему набору настраиваемых вычислительных ресурсов.

С развитием цифровых технологий происходит и развитие методов и инструментов БП. Появляются новые инструменты, основанные на цифровых

Таблица 3. Сравнительная характеристика объектов производственной системы переходного периода и «Индустрии 4.0»
Table 3. Comparative characteristics of objects of the production system of the transition period and "Industry 4.0"

Объект производственной системы	Источник данных	Производство (сегодня)		Производство («Индустрия 4.0»)	
		Характеристика	Технологии	Характеристика	Технологии
Детали	Сенсор	Точность	«Умные датчики» и обнаружение неисправностей	Возможность выбрать конкретный вариант действия	Анализ возникающих ошибок и определение и предупреждение возможных проблем в работе оборудования
Станки	Контроллер	Производительность и эффективность	Мониторинг и диагностика	Возможность выбрать конкретный вариант действия	Мониторинг состояний
Производственная система	Сетевая система	Выход продукции и OEE	Реализация концепции БП, внедрение инструментов, способствующих уменьшению или нивелированию потерь	Самодостаточность системы в определении решения возможных проблем, самоорганизация	Качество и продуктивность, бесперебойная работа

Таблица 4. Основные цифровые инструменты бережливого производства
Table 4. Essential digital tools for lean manufacturing

Цифровой инструмент БП	Описание	Преимущества
Системы управления производством (MES)	Системы для мониторинга, управления и оптимизации производственных процессов	Повышение эффективности, уменьшение потерь, реальное время анализа
Цифровые двойники	Виртуальные копии физических объектов, процессов или систем, позволяющие проводить их анализ и оптимизацию	Уменьшение затрат на тестирование, улучшение качества продуктов
Интернет вещей (IoT)	Устройства, подключенные к интернету, собирающие и передающие данные для анализа	Улучшение мониторинга и управления, прогнозирование поломок
Аналитика больших данных (Big Data)	Методы анализа больших объемов данных для выявления паттернов и трендов	Углубленное понимание процессов, прогнозирование потребностей
Автоматизация процессов (RPA)	Использование программных роботов для автоматизации рутинных процессов	Увеличение скорости работы, освобождение времени для творческих задач

технологиях в совокупности с фундаментальными принципами бережливого производства [6]. Совмещение цифровых технологий с принципами бережливого производства открывает перед организациями новые горизонты для оптимизации процессов и повышения эффективности.

В табл. 3 представлена сравнительная характеристика некоторых объектов производственной системы на основе обеспечивающих их технологий в настоящее время и в рамках «Индустрии 4.0». В качестве объектов представлены детали, станки и производственная система в целом. Не сложно заметить, что главное отличие двух производственных систем заключается в автоматизированном подходе, применяемом по отношению ко всем объектам производственной системы «Индустрия 4.0», что обеспечивает непрерывное отслеживание всех процессов и безупречную продуктивность. В свою очередь, это должно достигаться, в том числе, путем внедрения цифровых инструментов бережливого производства.

Поэтапный процесс создания бережливой производственной системы с использованием цифро-

вых инструментов, разработанный в виде алгоритма, представлен на рис. 1 [7].

Основные цифровые инструменты бережливого производства и их характеристика приведены в табл. 4.

Более детальное описание процессов при внедрении бережливой производственной системы с использованием цифровых инструментов в производственный процесс, представленное на рис. 1, отражено в табл. 5.

Применение цифровых инструментов, способствующих увеличению производительности, позволяет существенно сократить потери в организационных процессах и сосредоточить ресурсы компаний на реализации мероприятий по улучшению производительности [8].

Например, концепция бережливого производства с использованием цифровых технологий давно реализуется на ПАО «КАМАЗ» [9]. Так, в январе 2024 г. на предприятии завершился эксперимент, который был связан с использованием для мониторинга качества лакокрасочных покрытий кузовных деталей цифровых инструментов. В частности,

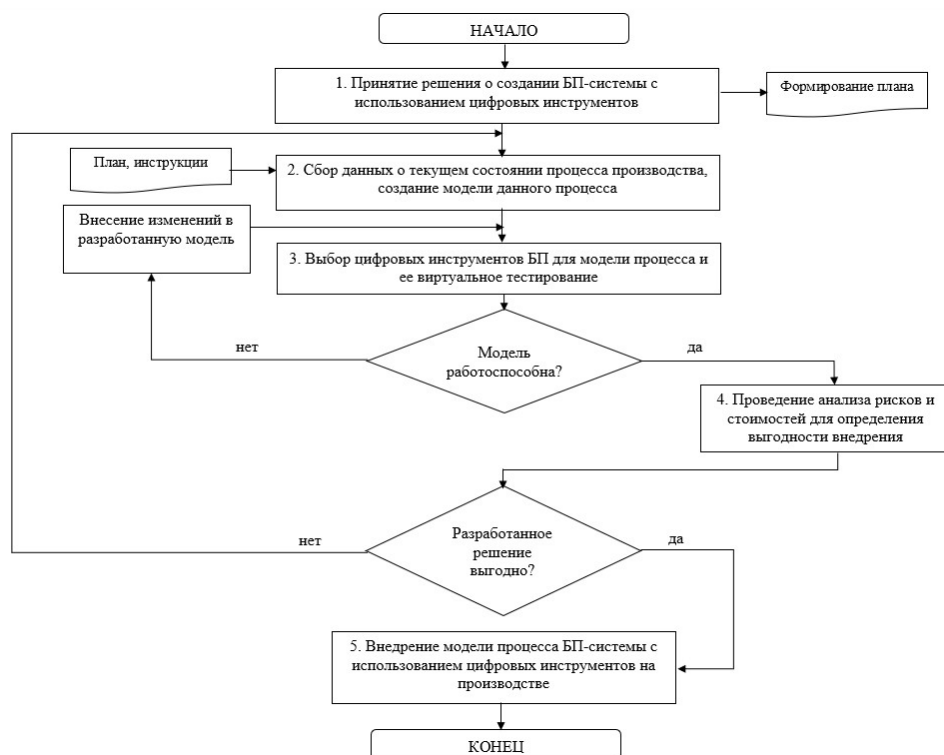


Рис. 1. Процесс внедрения бережливой производственной системы с использованием цифровых инструментов в производственный процесс
Fig. 1. Process of implementing a lean production system using digital tools in the production process

использовалась система компьютерного зрения, которая позволяла отслеживать дефекты грунтования деталей [10]. Работа системы компьютерного зрения связана с идентификацией образа изделия, его типа и структуры, определением качества грунта и погрешностей при нанесении покрытий. Данные отражаются в архиве, также происходит оповещение ответственных лиц, что позволяет своевременно предотвратить выпуск некачественной продукции (бракованные изделия не передаются на следующий производственный этап). В результате применения системы количество дефектов значительно снизилось по сравнению с предшествующим периодом, когда мониторинг осуществлялся сотрудниками предприятия [11]. Данный пилотный проект определил значимость цифровых технологий для уменьшения дефектов при нанесении лакокрасочных покрытий кузовных деталей (за счет нивелирования человеческого фактора). Таким образом, система компьютерного зрения обеспечивает минимизацию ошибок при оценке качества грунтовки деталей перед покраской и снижение непредвиденных расходов.

В рамках реализации данного проекта на ПАО «КАМАЗ» были достигнуты значительные успехи: функционал подсчёта количества деталей достиг уровня 90–95 % (ранее 80–85 %), а определение качества грунтовки изделия около 90 % (ранее порядка 82 %). Данный проект ярко демонстрирует способность цифровых инструментов БП оказывать прорывное воздействие на уровень качества выпускаемой продукции и работу всего промышленного предприятия.

Государственная корпорация «Ростех» так же добилась выдающихся успехов в области внедрения передовых цифровых решений на предприятиях

машиностроительной отрасли, что было продемонстрировано на конференции «АвиаЦифра-2025».

Особое внимание привлекли разработки в областях:

1. Цифровых двойников — данная технология успешно применяется при производстве авиадвигателей, включая силовую установку ТВ7-117СТ-01 самолёта Ил-114-300, позволяя сокращать сроки разработки и снижать затраты.

2. Искусственного интеллекта — активно внедряется в производственные процессы.

3. Систем анализа качества — решение «РТ-Техприёмка» уже снизило количество дефектов на 20 %.

АО «Силовые машины» (входит в Государственную корпорацию «Ростех») — один из лидеров российского энергомашиностроения, производящее турбины для ТЭС, ГЭС и АЭС. Внедрение искусственного интеллекта (AI) и предиктивной аналитики позволяет компании снижать риски аварий, оптимизировать обслуживание и повышать надёжность оборудования.

Система мониторинга турбин основана на комплексном использовании IoT-датчиков, искусственного интеллекта и цифровых двойников. Многочисленные датчики, установленные на оборудовании, непрерывно собирают данные о вибрациях, температурах, давлении и электрических параметрах. Эти показатели в реальном времени анализируются алгоритмами машинного обучения, которые сравнивают текущие значения с нормативными моделями и историческими данными, выявляя аномалии и прогнозируя возможные отказы.

Внедрение AI-системы мониторинга турбин в АО «Силовые машины» даёт значимый количественный эффект:

Таблица 5. Детальное описание этапов процесса внедрения БП-системы с использованием цифровых инструментов
Table 5. Detailed description of the stages of the process of implementing a BP-system using digital tools

Этап процесса	Элемент процесса	Входные данные	Описание
1. Принятие решения о создании БП-системы с использованием цифровых инструментов	Решение	Опирается на научно-технический прогресс	Принятие решения о внедрении цифровых инструментов
	Формирование цели	Анализ конкретных потребностей предприятия	Выявление этапа производства для внедрения цифровых инструментов, а также определение персонала, который будет привлечен к процессу производства
2. Сбор данных о текущем состоянии процесса производства, создание модели данного процесса	Анализ данных	Процесс, который требует внедрения цифровых инструментов	Отработка заложенного в техническом задании функционала продукта на всех этапах
	Модель выбранного процесса	Виртуальная модель процесса	Создание виртуальной модели процесса
3. Выбор цифровых инструментов БП для модели процесса и ее виртуальное тестирование	Выбор цифровых инструментов	Цифровые инструменты БП	Определение наиболее подходящих для процесса цифровых инструментов БП
	Тестирование	Созданная виртуальная модель процесса с использованием цифровых инструментов БП	Имитация производственного процесса со всеми его составляющими позволяет тестировать и при необходимости корректировать его
4. Проведение анализа рисков и стоимостей для определения выгоды внедрения	Анализ рисков	Риски при использовании цифровых инструментов БП	Учет ограничений функций цифрового продукта и компенсация рисков
	Анализ стоимостей	Смета	Подготовка сметы и планирование бюджета на ввод нового цифрового инструмента
5. Внедрение модели процесса БП-системы с использованием цифровых инструментов на производстве	Данное внедрение предполагает необходимость дополнительного обучения для персонала	Сотрудники получают необходимые инструкции	Внедрению модели процесса БП-системы с использованием цифровых инструментов на производстве предшествует этап обучения или совершенствования уровня владения необходимыми навыками
	Процесс внедрения постепенный и поэтапный	Персонал получает план ввода в эксплуатацию и соответствующие инструкции	Важным элементом производства становится адаптация персонала к новому IT продукту. Эта адаптация происходит легко, так как использует технику минимальных изменений
	Внедрение	Персонал получает план ввода в эксплуатацию и соответствующие инструкции	Рабочий процесс защищен от проблемных ситуаций, связанных со сбоем в IT системе
	В производственной системе имеется потенциал для использования дополнительных функций (настройка)	В систему могут быть введены дополнительные функции	Имеется возможность адаптации при использовании вновь введенных в техническое задание функций

1. Снижение аварийных простоев на 25–40 %.
2. Увеличение межремонтного периода на 15–20 %.
3. Сокращение затрат на ремонты на 18–22 %.
4. Повышение КПД оборудования на 3–5 % [12].

Отдельно стоит упомянуть о предприятиях, являющихся известными поставщиками решений для цифровизации бережливого производства. К ним относятся:

- компания Siemens, решения которой (например, MindSphere, Teamcenter) используются многими машиностроительными предприятиями для цифровизации производства;
- компания SAP: SAP S/4HANA также является популярным выбором для управления предприятием и оптимизации производственных процессов;
- 1C: Решения на платформе 1C: Предприятие широко применяются для управления производством (MES-системы и т.п.);

— DELMIA Apriso (Dassault Systèmes): MES-система для управления производством в реальном времени.

Учитывая сегодняшнюю геополитическую ситуацию, крайне необходимо поддерживать отечественных разработчиков цифровых решений в области управления производственными процессами для обеспечения технологического суверенитета [13].

Выводы и заключение

Эффективное производство является фундаментом успешной деятельности любого промышленного предприятия. Оно требует слаженной работы трех ключевых элементов: оборудования, технологических процессов и человеческих ресурсов, что в совокупности позволяет достигать оптимальных показателей выпуска продукции при фиксированном уровне капиталовложений [14]. Многие производители, в соответствии с концепцией бережливого производства, вкладывают средства в обучение

персонала новым методам работы, прежде всего цифровым, что позволяет выявить источники потерь на разных этапах производственного процесса и устранить этапы или отдельные операции, которые не несут вклад в прибыльность работы предприятия.

Цифровизация бережливого производства на машиностроительных предприятиях — это катализатор, ускоряющий достижение амбициозных целей. Внедрение передовых цифровых решений позволяет ощутить синергетический эффект от сочетания бережливости и инноваций, проявляющийся в снижении издержек, повышении производительности, улучшении качества продукции и сокращении сроков выполнения заказов [15]. Более того, цифровые инструменты обеспечивают прозрачность и управляемость процессов, позволяя оперативно реагировать на изменения рыночной конъюнктуры и принимать обоснованные решения.

Однако важно осознавать, что внедрение цифровых инструментов требует определенного времени для перехода на качественно новый уровень производства и достаточно больших затрат, поскольку данная работа — результат совместной деятельности множества специалистов. Также необходимо учитывать некоторые особенности, например, при проектировании системы требуется адаптация персонала к работе в новой системе, в процессе эксплуатации — возможность провести донастройку цифровых инструментов с целью их интеграции в производственные процессы. При правильном подходе и учете всех деталей, возникающих на различных этапах внедрения цифровой бережливой системы, внедрение цифровых технологий может значительно усилить методы бережливого производства и открыть новые горизонты для их применения на предприятии.

Список источников / References

1. Бахматова Т. Г., Бахматов М. С. Тенденции и перспективы внедрения инструментов бережливого производства // Известия Байкальского государственного университета. 2022. Т. 32, № 4. С. 771–778. DOI: 10.17150/2500-2759.2022.32(4).771-778. EDN: DEGPBI.
2. Mingaleev G. F., Babushkin V. M., Akhmadeyeva G. Ch. [и др.] Разработка и реализация современных методов организации, управления и технологий бережливого производства на промышленных предприятиях Республики Татарстан: моногр. / под ред. Р. Х. Зарипова. 2-е изд., доп. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2015. 344 с. ISBN 978-5-7579-2040-5. EDN: WLBXJD.
3. Smirnov S. A., Sorokin G. S. Применение бережливого производства в российских компаниях // Евразий-

ская интеграция: экономика, право, политика. 2022. Т. 16, № 4 (42). С. 55–67. DOI: 10.22394/2073-2929-2022-04-55-67. EDN: XTADWI.

Smirnov S. A., Sorokin G. S. *Primeneniye berezhlivogo proizvodstva v rossiyskikh kompaniyakh* [Implementation of lean manufacturing methods in Russian companies]. *Eurasian Integration: Economics, Law, Politics*. 2022. Vol. 16, no. 4 (42). P. 55–67. DOI: 10.22394/2073-2929-2022-04-55-67. EDN: XTADWI. (In Russ.).

4. Маклакова К. А. Бережливое производство на машиностроительных предприятиях России // Экономика и социум. 2018. № 6 (49). С. 1666–1668. EDN: SIDYLF.

Maklakova K. A. *Berezhlivoye proizvodstvo na mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh Rossii* [Lean production at machine-building enterprises of Russia]. *Ekonomika i sotsium. Economics and Society*. 2018. No. 6 (49). P. 1666–1668. EDN: SIDYLF. (In Russ.).

5. Яковлева Е. Н. Концепция бережливого производства в здравоохранении // Аллея науки. 2019. Т. 1, № 12 (39). С. 380–385. EDN: OCWDKC.

Yakovleva E. N. *Kontseptsiya berezhlivogo proizvodstva v zdravookhraneni* [Concept of lean manufacturing in healthcare]. *Alleya Nauki*. 2019. Vol. 1, no. 12 (39). P. 380–385. EDN: OCWDKC. (In Russ.).

6. Петраков Д. В. Проблема цифровизации бережливого производства // Вестник науки. 2024. Т. 2, № 12 (81). С. 339–347. EDN: IWTHQJ.

Petrakov D. V. *Problema tsifrovizatsii berezhlivogo proizvodstva* [Digitalization problem lean manufacturing]. *Vestnik Nauki*. 2024. Vol. 2, no. 12 (81). P. 339–347. EDN: IWTHQJ. (In Russ.).

7. Нуртдинов Р. И. Разработка модели производственной системы, ориентированной на поддержание устойчивого развития предприятия // Вестник науки. 2024. Т. 2, № 1 (70). С. 196–199. EDN: GWZOVW.

Nurtdinov R. I. *Razrabotka modeli proizvodstvennoy sistemy, oriyentirovannoy na podderzhaniye ustoychivogo razvitiya predpriyatiya* [Development of production system model oriented to support sustainable development of enterprise]. *Vestnik Nauki*. 2024. Vol. 2, no. 1 (70). P. 196–199. EDN: GWZOVW. (In Russ.).

8. Голицынский П. В., Антонова У. Ю., Гринченко Л. А., Видникевич С. Ю. Применение цифровых инструментов для совершенствования производственного процесса // Компетентность. 2023. № 5. С. 32–37. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-5-32-37. EDN: CHXXCZ.

Golitsynskiy P. V., Antonova U. Yu., Grinchenko L. A., Vidnikevich S. Yu. *Primeneniye tsifrovyykh instrumentov dlya sovershenstvovaniya proizvodstvennogo protsesssa* [Digital tools to improve the manufacturing process]. *Kompetentnost'. Competency (Russia)*. 2023. No. 5. P. 32–37. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-5-32-37. EDN: CHXXCZ. (In Russ.).

9. Информационные технологии в КамАЗ. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационные_технологии_в_КамАЗ (дата обращения: 22.03.2025).

Informatsionnyye tekhnologii v KamAZ [Information technology in KAMAZ]. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Информационные_технологии_в_КамАЗ (accessed: 22.03.2025). (In Russ.).

10. Вейдер М. Инструменты бережливого производства. Москва: Альпина паблишер, 2005. С. 86–87.

Vehjder M. *Instrumenty berezhlivogo proizvodstva* [Lean tools]. Moscow, 2005. P. 86–87.

11. Ротер М. Тойота Ката. Лидерство, менеджмент и развитие сотрудников для достижения выдающихся результатов. Санкт Петербург: Питер, 2014. 304 с. ISBN 978-5-496-00904-1.

Roter M. *Toyota Kata. Liderstvo, menedzhment i razvitiye sotrudnikov dlya dostizheniya vydayushchikhsya rezul'tatov* [Toyota Kata. Managing people for improvement, adaptiveness and

superior results]. Saint Petersburg, 2014. 304 p. ISBN 978-5-496-00904-1. (In Russ.).

12. Андерсен Б. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования / пер. с англ. С. В. Ариничева. Москва: РИА «Стандарты и качество», 2003. 272 с. ISBN 5-94938-012-6.

Andersen B. Biznes-protsessy. Instrumenty sovershenstvovaniya [Business processes. Improvement tools] / trans. from Engl. S. V. Arinichev. Moscow, 2003. 272 p. ISBN 5-94938-012-6. (In Russ.).

13. Шальнев М. О., Денисова Я. В. Применение методов бережливого производства для улучшения управления производственными процессами на химическом предприятии // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 60–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-60-67. EDN: HUKLBB.

Shalnev M. O., Denisova Ya. V. Primeneniye metodov berezhlivogo proizvodstva dlya uluchsheniya upravleniya proizvodstvennymi protsessami na khimicheskom predpriyatii [Applying lean manufacturing practices to improve process control in a chemical plant]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 60–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-60-67. EDN: HUKLBB. (In Russ.).

14. Шальнев М. О., Денисова Я. В., Батталов А. Ф. Повышение экономической эффективности работы ООО «Газпром трансгаз Казань» при эксплуатации подогревателей газа на газораспределительной станции // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 53–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-53-59. EDN: XRDXFE.

Shalnev M. O., Denisova Ya. V., Battalov A. F. Povysheniye ekonomicheskoy effektivnosti raboty ООО «Gazprom transgaz Kazan'» pri ekspluatatsii podogrevateley gaza na gazoraspredelitel'noy stantsii [Increasing the economic efficiency of the work of Gazprom Transgaz Kazan LLC when operating gas heaters at gas distribution stations using a power supply unit]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 53–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-53-59. EDN: XRDXFE. (In Russ.).

15. Денисова Я. В., Петрова А. С., Сопин В. Ф. Оптимизация производственного процесса путем внедрения методов бережливого производства // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84, № 2 (92). С. 315–323. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-315-323. EDN: PFLUTQ.

Denisova Ya. V., Petrova A. S., Sopin V. F. Optimizatsiya proizvodstvennogo protsessa putem vnedreniya metodov berezhlivogo proizvodstva [Optimization of the production process through the introduction of lean production methods]. Vestnik VGUET. *Proceedings of VSUET*. 2022. Vol. 84, no. 2 (92). P. 315–323. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-315-323. EDN: PFLUTQ. (In Russ.).

ШАЛЬНЕВ Максим Олегович, аспирант кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ), г. Казань.

ORCID: 0009-0000-3389-4221

Адрес для переписки: maks228sh@gmail.com

ДЕНИСОВА Яна Владимировна, кандидат экономических наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества КНИТУ, г. Казань.

SPIN-код: 3706-5320

AuthorID (РИНЦ): 973897

ORCID: 0000-0003-1242-6909

Адрес для переписки: yana-denisova@inbox.ru

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

Статья поступила в редакцию 26.05.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 10.10.2025.

SHALNEV Maksim Olegovich, Postgraduate of the Analytical Chemistry, Certification and Quality Management Department, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan.

ORCID: 0009-0000-3389-4221

Correspondence address: maks228sh@gmail.com

DENISOVA Yana Vladimirovna, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Analytical Chemistry, Certification and Quality Management Department, KNRTU, Kazan.

SPIN-code: 3706-5320

AuthorID (RSCI): 973897

ORCID: 0000-0003-1242-6909

Correspondence address: yana-denisova@inbox.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 26.05.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 10.10.2025.

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЗОНЫ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

А. Б. Яров¹, А. В. Толлок^{1,2}, А. Е. Панкова³, А. Е. Ченцов³

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Россия, 127055, г. Москва, Вадковский пер., 1

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65

³Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова,
Россия, 170100, г. Тверь, ул. Жигарева, 50

В исследовании разработана усовершенствованная методика построения точных геометрических моделей зон обнаружения радиолокационных станций наземного базирования. Основной акцент сделан на интеграции функционально-воксельного подхода. Аналитическое описание диаграммы направленности задаётся через кусочно-заданные функции с углами $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$. Учтено преобразование между полярной и декартовой системами координат, а также применены R-функции для объединения используемых аналитических уравнений. Моделирование осуществляется с учётом интерференционного множителя земли с использованием следующих вычислительных методов: разложение матриц 5×5 на подматрицы 4×4 методом Лапласа; построение локальных аппроксимирующих плоскостей с нормированием коэффициентов. В работе разработаны 2D-модели с максимальной дальностью обнаружения 125,5 км, а также построены 3D-модели. В связи с использованием функционально-воксельного метода были построены базовые M-образы локальных характеристик. Точность моделирования соответствует показаниям функционально-воксельного метода, следовательно, значения модели рассчитываются в каждой точке и поддерживают непрерывность в зависимости от используемого масштаба.

Ключевые слова: функционально-воксельный метод, M-образ, R-функции, однородный вектор, локальные геометрические характеристики, диаграмма направленности, моделирование радиолокационных станций.

Для цитирования: Яров А. Б., Толлок А. В., Панкова А. Е., Ченцов А. Е. Функционально-воксельный метод для геометрического описания зоны обнаружения радиолокационной станции // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 43–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-43-50. EDN: BIQLJD.



© Яров А. Б., Толлок А. В., Панкова А. Е., Ченцов А. Е., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

FUNCTIONAL-VOXEL METHOD FOR GEOMETRIC DESCRIPTION OF A RADAR DETECTION ZONE

A. B. Yarov¹, A. V. Tolok², A. E. Pankova³, A. E. Chentsov³

¹Moscow State University of Technology "STANKIN", Russia, Moscow, Vadkovsky Ln., 1, 127055

²V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow, Profsoyuznaya St., 65, 117997

³Zhukov Air and Space Defence Academy, Russia, Tver, Zhigareva St., 50, 170100

The study presents an improved methodology for constructing precise geometric models of detection zones for ground-based radar stations. The primary focus is on integrating a functional-voxel approach. The analytical description of the radiation pattern is defined via piecewise functions with angles $\varepsilon_{\min} = 0.1^\circ$; $\varepsilon_0 = 1.7^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$. The transformation between polar and Cartesian coordinate systems is accounted for, and R-functions are applied to combine the analytical equations used. The modeling incorporates the Pattern Propagation Factor of the Earth using the following computational methods: decomposition of

5×5 matrices into 4×4 submatrices via Laplace's method and construction of local approximating planes with coefficient normalization. The study develops 2D-models with a maximum detection range of 125.5 km, as well as 3D-models. Since the functional-voxel method is employed, base M-shapes of local characteristics are constructed. The simulation accuracy aligns with functional-voxel method readings, meaning the model's values are calculated at each point while maintaining continuity, depending on the scale used.

Keywords: functional-voxel method, M-shape, R-functions, homogeneous vector, local geometric characteristics, radiation pattern, radar simulation.

For citation: Yarov A. B., Tolok A. V., Pankova A. E., Chentsov A. E. Functional-voxel method for geometric description of a radar detection zone. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 43–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-43-50. EDN: BIQLJD.



© Yarov A. B., Tolok A. V., Pankova A. E., Chentsov A. E., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В современных радиотехнических системах точное моделирование диаграмм направленности антенн играет ключевую роль [1–3]. В работе представлен поэтапный анализ формирования диаграммы направленности с использованием функционально-воксельного метода [4] для компьютерного представления. В первую очередь рассматривается базовая диаграмма направленности антенны на открытом пространстве, построенная на основе четырех функций при заданных, определяющих её, углах [5]. Далее, в модель вводится интерференционный множитель земли (ИМЗ), учитывающий переотражения от поверхности и её неидеальные свойства (комплексный коэффициент отражения Френеля) [6–8]. На заключительном этапе строится трёхмерная модель диаграммы направленности, интегрирующая пространственное распределение поля с учётом интерференционных эффектов.

Моделирование производится в программе на C++ с использованием WinAPI (<windows.h>), которая визуализирует геометрический объект в графическом окне. Реализация включает математическое описание объекта и его отрисовку через функцию SetPixel графической подсистемы Windows GDI (Graphics Device Interface).

1. Построение диаграммы направленности приёмопередающей антенны наземной обзорной радиолокационной станции

Рассмотрим функции, описывающие диаграмму направленности антенны для радиолокационных систем:

$$F(\varepsilon) = \begin{cases} 1 - \frac{\varepsilon_{\min} - \varepsilon}{\varepsilon_{\min}}, & \text{при } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{\min} \\ 1, & \text{при } \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_0 \\ \sin(\varepsilon_0) \operatorname{cosec}(\varepsilon), & \text{при } \varepsilon_0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{\max} \\ 0, & \text{при } \varepsilon_{\max} < \varepsilon < 90^\circ \end{cases}, \quad (1)$$

где $F(\varepsilon)$ — базовая функция диаграммы направленности радиолокационной станции (РЛС) в вертикальной плоскости, зависящая от угла места, m ; ε — параметр угла места, рад.; $\varepsilon_{\min}$ — значение минимального угла места, рад.; ε_0 — значение характеристического угла места, рад.; $\varepsilon_{\max}$ — значение максимального угла места, рад.

Так как функция задаётся для полярной системы координат, то необходимо перевести её в декартову. В данном случае функция примет следующий вид:

$$\sqrt{x^2 + y^2} - \begin{cases} 1 - \frac{\varepsilon_{\min} \frac{\pi}{180} - \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)}{\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)}, & \text{при } 0 < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \varepsilon_{\min} \\ 1, & \text{при } \varepsilon_{\min} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \varepsilon_0 \\ \sin\left(\varepsilon_0 \frac{\pi}{180}\right) \operatorname{cosec}\left(\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)\right), & \text{при } \varepsilon_0 \leq \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \varepsilon_{\max} \\ x \tan\left(\varepsilon_{\max} \frac{\pi}{180}\right), & \text{при } \varepsilon_{\max} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < 90^\circ \end{cases} = 0, \quad (2)$$

где $\sqrt{x^2 + y^2}$ — расстояние от начала координат до границы области, выраженное через формулу преобразования; $\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)$ — угол между положительной осью Ox и радиус-вектором точки аргумента, выраженный через формулу преобразования.

Полученные функции задают необходимую область в неявном виде. Чтобы построить функционально-воксельную модель (ФВ-модель) на компьютере, необходимо привести их к предикатному виду [9].

Для этого приравняем правую часть полученной неявной функции к переменной w . В данном случае для функции можно выделить нулевую, положительную и отрицательную зоны для заданной области значений, чтобы применять их в теоретико-множественных операциях R-функционального моделирования [10–11]. Следовательно, все четыре функции с сохранением условий возможно объединить в одну. Дадим каждой функции последовательные номера w_1, w_2, w_3, w_4 и объединим их в одну с использованием R-функции пересечения:

$$w = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} - \sqrt{w_3^2 + (w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2})^2} - \sqrt{\left(\frac{w_1 + w_2 + w_3 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2}}{-\sqrt{w_3^2 + (w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2})^2}} \right)^2} + w_4^2. \quad (3)$$

Для получения компьютерного представления области такой функции обеспечим переход к локальной функции в точке на заданной области в пространстве аргументов, применив инструмент функционально-воксельного моделирования. Получим локальные геометрические характеристики для каждой точки области функции (3):

$$\begin{aligned} a_1 &= y_1(z_2 - z_3) - y_2(z_1 - z_3) - y_3(z_1 - z_2), \\ a_2 &= -(x_1(z_2 - z_3) - x_2(z_1 - z_3) - x_3(z_1 - z_2)), \\ a_3 &= x_1(y_2 - y_3) - x_2(y_1 - y_3) - x_3(y_1 - y_2), \\ a_4 &= -\begin{pmatrix} x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) - \\ -x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) - x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Угловые локальные геометрические характеристики вычисляются нормированием коэффициентов:

$$n_i = \frac{a_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 a_i^2}}, \quad i = 1 \dots 4, \quad (5)$$

$$M_i = \frac{P(1 + n_i)}{2}, \quad i = 1 \dots 4, \quad P = 256, \quad (6)$$

где P — выбранное разрешение палитры глубины цвета, которое пропорционально точности моделирования. Для представленной задачи достаточно использование 256 оттенков цвета.

Полученное уравнение вида $n_1 x + n_2 y + n_3 z + n_4 = 0$ является аппроксимирующей функцией или локальным представлением области функции, которое позволяет рассчитывать значение функции z в каждой точке на заданной области [12]. На основании функции (6) на рис. 1 демонстрируется наглядное представление получаемых локальных геометрических характеристик, закодированных в полутоновое значение, а на рис. 2а визуализирован график для зон положительных и отрицательных значений. Рис. 2б представляет собой диаграмму направленности, получаемую классическим расчётом для сравнения.

2. Построение двухмерной зоны обнаружения наземной обзорной РЛС с учётом отражений от плоской подстилающей поверхности и рефракции радиоволн

Эффект многолучевого распространения радиоволн, обусловленный переотражениями от земной поверхности, учитывается посредством интерференционного множителя земли $|\Phi(\epsilon)|$, представляющего собой комплексную функцию.

Для его определения необходимо учитывать высоту расположения антенны h' (подъема излучателя), коэффициент $\hat{R}_r$ (коэффициент Френеля), отражения плоской волны от плоской границы раздела двух сред, угол возвышения точки наблюдения

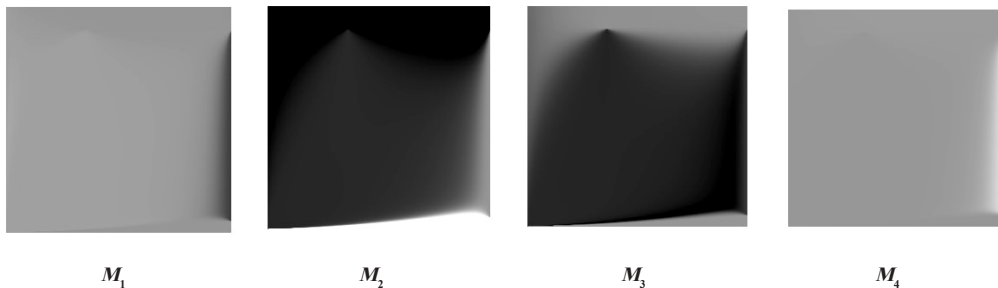


Рис. 1. М-образы, отображающие локальные геометрические характеристики для диаграммы направленности при минимальном значении угла места $\epsilon_{\min} = 0,1^\circ$; максимальном значении угла места $\epsilon_{\max} = 4^\circ$; значении характеристического угла места $\epsilon_0 = 1,7^\circ$

Fig. 1. M-shapes displaying local geometric characteristics for the radiation pattern at minimum elevation angle $\epsilon_{\min} = 0.1^\circ$; maximum elevation angle $\epsilon_{\max} = 4^\circ$; characteristic elevation angle $\epsilon_0 = 1.7^\circ$

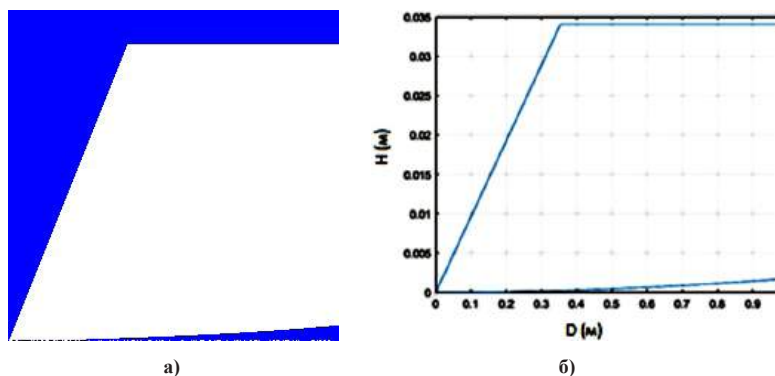


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны в полярной системе координат: а — график зон положительных и отрицательных значений; б — диаграмма направленности, получаемая классическим расчётом для сравнения

Fig. 2. Antenna radiation pattern in polar coordinate system: а — a map of positive and negative value zones; б — a radiation pattern obtained by classical calculation for comparison

ϵ (воздушного объекта), вид поляризации радиоволны и характера подстилающей поверхности.

При построении диаграмм направленности или расчёте напряжённости поля всегда используется модуль интерференционного множителя, поэтому диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости с учетом отражений от плоской подстилающей поверхности и дальности обнаружения рассчитывается в соответствии с выражением:

$$Dn(\epsilon) = r_{\max} \cdot F(\epsilon) \cdot |\Phi(\epsilon)|, \quad (7)$$

где $r_{\max}$ — дальность обнаружения, м; $F(\epsilon)$ — базовая функция диаграммы направленности РЛС в вертикальной плоскости, зависящая от угла места по формуле (1), м.

Интерференционный множитель земли для горизонтально поляризованной плоской волны вычисляется следующей функцией:

$$|\Phi(\theta)| = \sqrt{1 + |\dot{R}_r|^2 + 2 \cdot |\dot{R}_r| \cdot (2k_0 \cdot h' \cdot \sin(\epsilon) + \beta_r)}, \quad (8)$$

где k_0 — волновое число; λ — длина волны; $\dot{R}_r$ — коэффициент отражения для горизонтальной поляризации электромагнитной волны; β_r — аргумент коэффициента $\dot{R}_r$.

Коэффициент отражения для горизонтальной поляризации плоской волны определяется в соответствии с выражением (индекс 2 соответствует подстилающей поверхности, а индекс 1 — атмосфере):

$$\dot{R}_r = \frac{\dot{\mu}_{a2} \dot{k}_1 \sin(\epsilon) - \dot{\mu}_{a1} \sqrt{\dot{k}_2^2 - \dot{k}_1^2 (\cos(\epsilon))^2}}{\dot{\mu}_{a2} \dot{k}_1 \sin(\epsilon) + \dot{\mu}_{a1} \sqrt{\dot{k}_2^2 - \dot{k}_1^2 (\cos(\epsilon))^2}}, \quad (9)$$

где $\dot{k} = \omega \sqrt{\dot{\epsilon}_a \cdot \mu_a}$ — комплексный коэффициент фазы; $\omega = 2\pi \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda}$ — круговая частота, рад/с;

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(1 - \frac{\epsilon_{\min} \frac{\pi}{180} - \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)}{\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)} - \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\epsilon)|, & \text{при } 0 < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \epsilon_{\min} \\ \left(1 - \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\epsilon)|, & \text{при } \epsilon_{\min} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \epsilon_0 \\ \left(\sin\left(\epsilon_0 \frac{\pi}{180}\right) \operatorname{cosec}\left(\operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right)\right) - \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\epsilon)|, & \text{при } \epsilon_0 \leq \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < \epsilon_{\max} \\ x \tan\left(\epsilon_{\max} \frac{\pi}{180}\right) - y, & \text{при } \epsilon_{\max} < \operatorname{atan}\left(\frac{y}{x}\right) < 90^\circ \end{array} \right. = 0. \quad (10)$$

Вычислительная реализация модели разрабатывается в соответствии с методологией, изложенной в разделе 1.

Математической основой является последовательное применение уравнений (3) – (5) для расчёта в соответствии с [12].

На рис. 3 показана диаграмма направленности с изменёнными зонами положительных и отрицательных значений в сравнении с рис. 2.

Учёт ИМЗ привёл визуализацию диаграммы направленности к более привычному виду «лепестка».

Результаты локальных геометрических характеристик представлены на рис. 4.

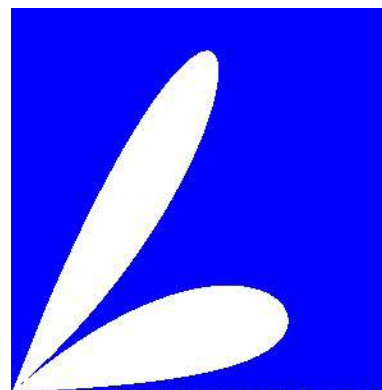


Рис. 3. Диаграмма направленности зон отрицательных и положительных значений используемой функции (10)
Fig. 3. Radiation pattern showing zones of positive and negative values of the applied function (10)

λ — длина волны, м; $\dot{\epsilon}_a = \epsilon_a - j \cdot \frac{\sigma}{\omega}$ — комплексная абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды; $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9}$ — электрическая постоянная вакуума; μ — абсолютная магнитная проницаемость среды; $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ — относительная магнитная проницаемость среды; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная вакуума; σ — удельная проводимость среды.

Значение максимальной дальности обнаружения воздушного объекта с заданными величинами вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги воздушного объекта в РЛС с потерями определяется отдельно. В качестве примера принято значение $r_{\max} = 125\,500$ м.

Итоговый вид функций:

3. Построение трехмерной ФВ-модели зоны обнаружения наземной обзорной РЛС с учётом отражений от плоской подстилающей поверхности и рефракции радиоволн

Для построения модели зоны обнаружения целесообразно применить метод вращения. В качестве оси вращения выбирается ось X, после чего аргумент Y заменяется на радиус вращения $\sqrt{x^2 + y^2}$. Учитывая, что исходная функция уже содержала единичную ось Z при переходе к однородным координатам, необходимо выполнить переход в пространстве более высокой размерности. В результате преобразований итоговые функции принимают следующий вид:



Рис. 4. M -образы, отображающие локальные геометрические характеристики для диаграммы направленности при значении угла места $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$ аналитического уравнения (10)
Fig. 4. M -shapes displaying local geometric characteristics for the radiation pattern at: elevation angle $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$ of the analytical equation (10)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\min} \frac{\pi}{180} - \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)}{\operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \times \\ \times r_{\max} \cdot |\Phi(\varepsilon)|, & \text{при } 0 < \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < \varepsilon_{\min} \\ \left(1 - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \cdot r_{\max} \cdot |\Phi(\varepsilon)|, & \text{при } \varepsilon_{\min} < \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < \varepsilon_0 \\ \left(\sin\left(\varepsilon_0 \frac{\pi}{180}\right) \operatorname{cosec}\left(\operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)\right) - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \times \\ \times r_{\max} \cdot |\Phi(\varepsilon)|, & \text{при } \varepsilon_0 \leq \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < \varepsilon_{\max} \\ \sqrt{x^2 + y^2} \tan\left(\varepsilon_{\max} \frac{\pi}{180}\right) - z, & \text{при } \varepsilon_{\max} < \operatorname{atan}\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) < 90^\circ \end{array} \right. = 0. \quad (11)$$

При построении трёхмерной зоны и при увеличении размерности функции необходимо брать не три, а четыре точки для нахождения локальной функции. Используем применяемую ранее методику и получаем локальные геометрические характеристики для каждой точки области функции (3) при условии использования аналитических уравнений, указанных в (10).

Разложим определитель для получения коэффициентов уравнения плоскости. Для матрицы 5×5 используется метод Лапласа.

Основные коэффициенты уравнения плоскости получают следующий вид:

$$\begin{aligned} a1 &= y1 \cdot Ma11 - z1 \cdot Ma12 + u1 \cdot Ma13 - Ma14, \\ a2 &= -(x1 \cdot Ma21 - z1 \cdot Ma22 + u1 \cdot Ma23 - Ma24), \\ a3 &= x1 \cdot Ma31 - y1 \cdot Ma32 + u1 \cdot Ma33 - Ma34, \\ a4 &= -(x1 \cdot Ma41 - y1 \cdot Ma42 + z1 \cdot Ma43 - Ma44), \\ a5 &= x1 \cdot Ma51 - y1 \cdot Ma52 + z1 \cdot Ma53 - u1 \cdot Ma54. \end{aligned} \quad (12)$$

После нормирования полученных коэффициентов (12) по имеющейся формуле (5) получаем уравнение вида $n_1x + n_2y + n_3z + n_4u + n_5 = 0$. Оно является локальным представлением области функции трехмерной модели на компьютере.

На рис. 5 показано одно из сечений положительных и отрицательных значений по оси Z получаемой модели. В отличие от прошлых вариантов, в данном случае диаграмма направленности представлена в горизонтальной плоскости для лучшей

видимости результата получаемой геометрической модели.

На рис. 6 представлены графические образы локальных геометрических характеристик [13]. Количество характеристик увеличилось в сравнении с рис. 4, так как расчёт ведётся для трёхмерного объекта.

Итоговый вариант модели показан на рис. 7.

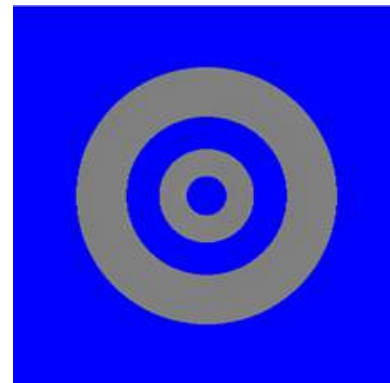


Рис. 5. Визуализация сечения области положительных и отрицательных значений модели
Fig. 5. Cross-section visualization of positive and negative values of the model

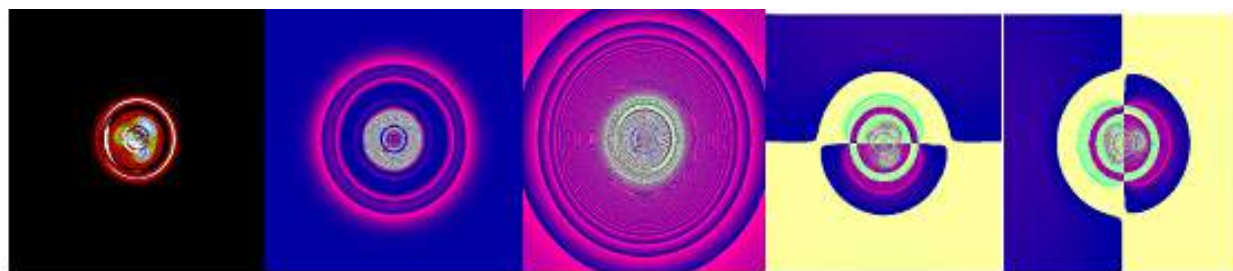


Рис. 6. М-образы в RGB-формате (16777215 оттенков цвета), отображающие локальные геометрические характеристики для 3D-модели в одном из сечений при значении угла $\varepsilon_{\min} = 0,1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1,7^\circ$
Fig. 6. M-shapes in RGB-format (16777215 colour shades), displaying local geometric characteristics for the 3D-model in one cross-section at angle $\varepsilon_{\min} = 0.1^\circ$; $\varepsilon_{\max} = 4^\circ$; $\varepsilon_0 = 1.7^\circ$

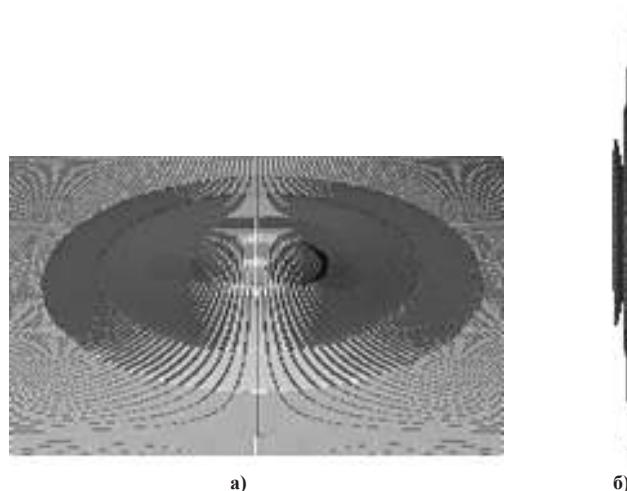


Рис. 7. Визуализация модели зоны обнаружения РЛС:
а — вид сверху; б — вид справа
Fig. 7. Visualization of the radar detection zone model:
a — top view; б — right-side view

Заключение

Проведённое исследование демонстрирует эффективность применения функционально-воксельного метода для моделирования диаграмм направленности на компьютере.

Базовая диаграмма направленности, построенная на основе локальных уравнений, послужила отправной точкой в построении радиолокационной модели.

Учёт интерференционного множителя земли и радиуса дальности позволил выявить характерные минимумы и максимумы излучения, обусловленные взаимодействием прямого и отражённого лучей.

3D-модель наглядно продемонстрировала пространственное распределение поля, включая азимутальные и угломестные зависимости.

Полученные данные могут быть использованы для:

- оптимизации размещения антенн над реальным рельефом;
- прогнозирования зон покрытия в радиосвязи;
- анализа помех в сложных электромагнитных условиях.

Перспективным направлением исследования являются построение зоны обнаружения с учётом влияния Земли и кривизны земной поверхности.

Список источников / References

1. Сухоруков А. П., Бабушкин А. К., Михайлов Е. В. [и др.]. Возможности систем геопро пространственного моделирова-

ния в задачах прогнозирования распространения радиоволн и электромагнитной экологии // Радиолокация и радиосвязь: III Всерос. конф. 2009. С. 630–640.

Sukhorukov A. P., Babushkin A. K., Mikhaylov E. V. [et al.]. Vozmozhnosti sistem geoprostranstvennogo modelirovaniya v zadachakh prognozirovaniya rasprostraneniya radiovoln i elektromagnitnoy ekologii [Capabilities of geospatial modeling systems in the problems of radio wave propagation forecasting and electromagnetic ecology]. *Radiolokatsiya i Radiosvyaz'*. P. 630–640. (In Russ.).

2. Татарский Б. Г., Ясенцев Д. А., Сурков А. А. Формирование радиолокационных изображений в некогерентных многопозиционных радиолокационных системах // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2024. Т. 198, № 1. С. 47–53. EDN: BAYQMP.

Tatarsky B. G., Yasentsev D. A., Surkov A. A. Formirovaniye radiolokatsionnykh izobrazheniy v nekogerentnykh mnogopozitsionnykh radiolokatsionnykh sistemakh [Formation of radar images in incoherent multi-position radar systems]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM. Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies*. 2024. Vol. 198, no. 1. P. 47–53. EDN: BAYQMP. (In Russ.).

3. Дорогов А. Ю., Яшин А. И. Программный комплекс моделирования пакетных радиосетей КВ-диапазона // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12, № 6. С. 26–37. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-26-37. EDN: QOBFCL.

Dorogov A. Yu., Yashin A. I. Programmnyy kompleks modelirovaniya paketnykh radiosetey KV-diapazona [Software package for modeling HF-band packet radio networks]. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh*

Zemli. *High Tech in Earth Space Research*. 2020. Vol. 12, no. 6. P. 26–37. DOI: 10.36724/2409-5419-2020-12-6-26-37. EDN: QOBFCL. (In Russ.).

4. Толок А. В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании / под ред. С. Н. Васильева. Москва: Физматлит, 2016. 112 с. ISBN 978-5-9221-1680-0. (In Russ.).

Tolok A. V. Funktsional'no-voksel'nyy metod v komp'yuternom modelirovani [Functional-Voxel method in computer modeling] / ed. by S. N. Vasilyev. Moscow, 2016. 112 p. ISBN 978-5-9221-1680-0. (In Russ.).

5. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я. Д. Ширмана. Москва: Советское радио, 1970. 560 с.

Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii [Theoretical radar foundations] / ed. by Ya. D. Shirman. Moscow, 1970. 560 p. (In Russ.).

6. Бердышев В. П., Гарин Е. Н., Фомин А. Н. [и др.]. Радиолокационные системы / под общ. ред. В. П. Бердышева. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 400 с. ISBN 978-5-7638-2479-7.

Berdyshev V. P., Garin E. N., Fomin A. N. [et al.]. Radiolokatsionnyye sistemy [Radar systems] / ed. by V. P. Berdyshev. Krasnoyarsk, 2011. 400 p. ISBN 978-5-7638-2479-7. (In Russ.).

7. Справочник по радиолокации. В 2 кн. / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. В. С. Вербы. Москва: Техносфера, 2014. Кн. 1. 672 с. ISBN 978-5-94836-381-3.

Spravochnik po radiolokatsii. V 2 kn. [Handbook of radar systems]. In 2 vols. / ed. by M. I. Skolnik; trans. from Engl. V. S. Verba. Moscow, 2014. Bk. 1. 672 p. ISBN 978-5-94836-381-3. (In Russ.).

8. Тяпкин В. Н., Фомин А. Н., Гарин Е. Н. [и др.]. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / под общ. ред. В. Н. Тяпкина. 2-е изд., перераб. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 536 с. ISBN 978-5-7638-3410-9.

Tyapkin V. N., Fomin A. N., Garin E. N. [et al.]. Osnovy postroyeniya radiolokatsionnykh stantsiy radiotekhnicheskikh voysk [Fundamentals of radar systems for radio engineering troops] / ed. by V. N. Tyapkin. 2nd ed., revised. Krasnoyarsk, 2016. 536 p. ISBN 978-5-7638-3410-9. (In Russ.).

9. Толок А. В. Применение воксельных моделей в процессе автоматизации математического моделирования // Автоматика и телемеханика. 2009. № 6. С. 167–180. EDN: MWKIBL.

Tolok A. V. Primeneniye voksel'nykh modeley v protsesse avtomatizatsii matematicheskogo modelirovaniya [Using voxel models in automation of mathematical modeling]. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2009. No. 6. P. 167–180. EDN: MWKIBL. (In Russ.).

10. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения: моногр. Киев: Наукова думка, 1982. 552 с.

Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryye eye prilozheniya [Theory of R-functions and some of its applications]. Kyiv, 1982. 552 p. (In Russ.).

11. Максименко-Шейко К. В., Мацевитый А. М., Толок А. В., Шейко Т. И. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве // Информационные технологии. 2007. № 10. С. 23–32. EDN: IJQBMN.

Maksimenko-Sheyko K. V., Matsevityy A. M., Tolok A. V., Sheyko T. I. R-funktsii i obratnaya zadacha analiticheskoy geometrii v trekhmernom prostranstve [R-functions and inverse problem of analytic geometry in three-dimensional space]. *Informatsionnyye tekhnologii. Information Technologies*. 2007. No. 10. P. 23–32. (In Russ.).

12. Толок А. В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании / под ред. С. Н. Васильева. Москва: Физматлит, 2016. 112 с. ISBN 978-5-9221-1680-0.

Tolok A. V. Funktsional'no-voksel'nyy metod v komp'yuternom modelirovani [Functional-voxel method in computer modeling] / ed. by S. N. Vasilyev. Moscow, 2016. 112 p. ISBN 978-5-9221-1680-0. (In Russ.).

13. Толок А. В. Графические образы-модели в информационных технологиях // Прикладная информатика. 2009. № 4. С. 31–40. EDN: KWMTBP.

Tolok A. V. Graficheskiye obrazy-modeli v informatsionnykh tekhnologiyakh [Graphic image-models in information technologies]. *Prikladnaya informatika. Applied Informatics*. 2009. No. 4. P. 31–40. EDN: KWMTBP. (In Russ.).

ЯРОВ Алексей Борисович, аспирант кафедры «Инженерная графика» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), г. Москва.

Адрес для переписки: ab.yarov@yandex.ru

ТОЛОК Алексей Вячеславович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Инженерная графика» МГТУ «СТАНКИН», г. Москва; главный научный сотрудник лаборатории 18 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва.

SPIN-код: 9269-9260

ORCID: 0000-0002-7257-9029

AuthorID (SCOPUS): 28268055700

ResearcherID: V-7594-2019

Адрес для переписки: tolok_61@mail.ru

ПАНКОВА Анастасия Евгеньевна, адъюнкт кафедры «Автоматизированные системы управления (и связи)» Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь.

Адрес для переписки: nastya-pankova1998.1998@mail.ru

ЧЕНЦОВ Александр Евгеньевич, доктор военных наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского центра (ПВО-ПРО) Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь.

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

Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 19.07.2025; принята к публикации 08.10.2025.

YAROV Aleksey Borisovich, Postgraduate of the Engineering Graphics Department, Moscow State University of Technology "STANKIN" (MSUT "STANKIN"), Moscow.

Correspondence address: ab.yarov@yandex.ru

TOLOK Aleksey Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Engineering Graphics Department, MSUT "STANKIN", Moscow; Chief Researcher at the Laboratory 18, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow.

SPIN-code: 9269-9260

ORCID: 0000-0002-7257-9029

AuthorID (SCOPUS): 28268055700

ResearcherID: V-7594-2019

Correspondence address: tolok_61@mail.ru

PANKOVA Anastasiya Evgenyevna, Adjunct of the Automated Control (and Communication) Systems



Department, Zhukov Air and Space Defence Academy, Tver.

Correspondence address: nastya-pankova1998.1998@mail.ru

CHENTSOV Aleksandr Evgenyevich, Doctor of Military Sciences, Senior Researcher at the Research Center (PVO-PRO), Zhukov Air and Space Defence Academy, Tver.

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

The article was submitted 03.06.2025; approved after reviewing 19.07.2025; accepted for publication 08.10.2025.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ХИМИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ ТРУБ

Н. Д. Прокопенко, М. С. Морозова, М. Ю. Чубуков

АО «Волжский трубный завод», Россия, 404119, г. Волжский, пр. Metallurgov, 6

В настоящей статье представлены результаты применения методов и инструментов бережливого производства для повышения эффективности процесса химической обработки труб в условиях Волжского трубного завода.

В работе представлен практический опыт применения инструментов бережливого производства, в частности методологии управления процессами Lean Six Sigma, с целью рационального использования кислот при химической обработке труб и повышения производительности труда. Для достижения поставленной цели был использован подход концепции бережливого производства DMAIC.

С использованием инструментов бережливого производства определены наиболее оптимальные технологические режимы и ключевые факторы процесса химической обработки труб.

В ходе проведенного исследования была продемонстрирована целесообразность применения методов и инструментов бережливого производства на металлургическом предприятии.

Ключевые слова: бережливое производство, DMAIC, химическая обработка труб, регенерация кислот, травильные кислоты, металлургия, трубы из нержавеющей стали.

Для цитирования: Прокопенко Н. Д., Морозова М. С., Чубуков М. Ю. Опыт применения инструментов бережливого производства для снижения затрат на химическую обработку труб // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 51–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-51-57. EDN: WPGUMD.



© Прокопенко Н. Д., Морозова М. С., Чубуков М. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERTISE IN APPLYING LEAN MANUFACTURING TOOLS TO REDUCE COSTS OF THE PIPE CHEMICAL PROCESSING

N. D. Prokopenko, M. S. Morozova, M. Yu. Chubukov

JSC "Volga Pipe Plant", Russia, Volzhsky, Metallurgov Ave., 6, 404119

This article presents results of the use of lean production methods and tools to ensure improvement of efficiency of the pipes chemical processing process at JSC "Volga Pipe Plant".

The paper presents practical experience in applying lean production tools, particularly the Lean Six Sigma process management methodology, to optimize the use of acids in the chemical processing of pipes and improve labor productivity. To achieve this goal, the DMAIC lean manufacturing concept is used.

The use of lean production tools provides determination of the most optimum process conditions of the chemical processing of pipes.

The study demonstrates the feasibility of applying lean production methods and tools at a metallurgical enterprise.

Keywords: lean production, DMAIC, pipes chemical processing, acid regeneration, etching acids, metallurgy, stainless steel pipes.

For citation: Prokopenko N. D., Morozova M. S., Chubukov M. Yu. Expertise in applying lean manufacturing tools to reduce costs of the pipe chemical processing. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 51–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-51-57. EDN: WPGUMD.



© Prokopenko N. D., Morozova M. S., Chubukov M. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



Рис. 1. Схема производства горячепрессованных труб
Fig. 1. Scheme of production of hot-pressed pipes

Введение

Применение инструментов бережливого производства в любой сфере — надежный способ повысить эффективность процесса. Основная цель использования инструментов бережливого производства состоит в устранении потерь времени и ресурсов [1].

С изучением вопросов применения концепции бережливого производства на промышленных предприятиях в нашей стране связаны труды Н. В. Проsvирова [2], К. В. Бельш [3], М. А. Мирошниченко [4].

В концепции бережливого производства могут использоваться разные методы. К популярным методам бережливого производства относятся [5, 6]:

1. Система TPM (Total Productive Maintenance). Данный метод основан на исключении поломок оборудования за счёт его поддержки [7].

2. Система SMED (Single Minute Exchange of Dies). Данный метод основан на исключении потерь из-за ожидания и из-за брака за счёт быстрой переналадки оборудования [8].

3. Визуализация предполагает представление информации в наглядной форме (рисунки, диаграммы, графики, структурные схемы, карты, таблицы).

4. DMAIC (от англ. Define, Measure, Analyze, Improve, Control — определение, измерение, анализ, совершенствование, контроль). В цикле DMAIC решение каждой задачи улучшения процесса или устранения проблемы должно последовательно пройти через все фазы, для каждой фазы предполагаются конкретные действия и инструменты. Считается, что именно такая последовательность обеспечивает структурированный подход, позволяющий двигаться от определения сути проблемы к внедрению решений.

В работе представлены результаты применения методов и инструментов бережливого производства для повышения эффективности процесса химической обработки труб в условиях металлургического завода на предприятии АО «Волжский трубный завод» (г. Волжский) за период с марта 2023 г. по июнь 2024 г.

В металлургической отрасли широко используют процесс кислотной обработки (травления) стальных труб. Данную обработку применяют для очистки поверхности труб от окалины и/или стеклосмазки, наличие которых обусловлено способом производства труб, а также для придания трубам соответствующего внешнего вида. Схема производства труб в общем виде представлена на рис. 1.

В современном мире существует три вида травления металла: ионно-плазменное травление,

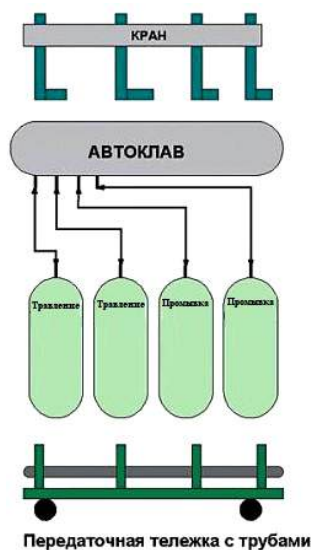


Рис. 2. Схема химической обработки в автоклаве
Fig. 2. Scheme of chemical processing in an autoclave

травление электролитами, химическое травление. Каждый вид имеет свои уникальные характеристики и области применения, позволяя эффективно обрабатывать металлические поверхности в зависимости от поставленных задач.

Химическое травление является наиболее распространенным способом. Оно отличается простотой в использовании и экономичностью. Данный способ позволяет эффективно обрабатывать большие площади и подходит для массового производства [9, 10].

При химическом травлении используют кислоты для очистки от окалины и создания пассивированного слоя. В процессе травления металл погружают в ванну с травильным раствором на определённое время при определённой температуре. В результате протекания химической реакции происходит удаление оксидной плёнки и окалины. Химическая реакция основана на взаимодействии неорганической кислоты с поверхностью металла — происходит выделение водорода. Метод обеспечивает получение чистой поверхности изделия.

Ежегодно в производстве для травления труб используют большое количество растворов неорганических кислот: серной, азотной, плавиковой. Использование данных кислот требует строгого соблюдения мер безопасности и контроля условий

работы, так как они являются высокоактивными веществами, способными вызывать серьёзные химические ожоги. Следовательно, в технологии травления постоянно внедряют мероприятия для минимизации рисков для работников и для снижения нагрузки на окружающую среду.

Горячепрессованные трубы подвергают травлению в серно-плавиковом растворе с целью удаления стеклосмазки и окалины. Трубы из нержавеющей стали аустенитного класса дополнительно подвергают осветлению поверхности в азотно-плавиковом и/или азотнокислом растворах с целью осветления поверхности и создания пассивирующего слоя.

Одним из эффективных способов химического травления является способ проведения обработки в автоклаве. К одному из преимуществ проведения химического травления в автоклаве можно отнести сокращение длительности обработки труб за счёт герметичности оборудования и проведения процесса при высоких температурах раствора и давлении выше атмосферного. В автоклав загружают трубы, далее поочерёдно подают травильные растворы и промывные воды, как показано на рис. 2.

Ежегодное потребление кислот для обработки порядка 40 000 т стальных труб превышает 2000 т, в том числе трубы из нержавеющей стали (например, 08/12X18H10T) из углеродистых металлов (например, 20, 09Г2С) и хромоникелевых сплавов (например, ХН60ВТ). Кислоты являются основным расходным материалом при производстве стальных труб. В условиях растущей конкуренции на рынке производители труб вынуждены искать способы снижения затрат без потери качества выпускаемой продукции.

Таким образом, возникает необходимость повышения экономической эффективности производства и оптимизации используемых ресурсов. Для данной цели может быть применена концепция бережливого производства. Она позволяет за счёт уникальных методов и инструментов достичь результата с минимальными затратами и необходимым качеством продукции для потребителя.

Целью работы является исследование влияния различных факторов на эффективность процесса травления стальных труб и обобщение опыта практического применения методов бережливого производства для оптимизации потребления ресурсов и достижения экономического результата.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе травления труб с целью получения требуемого результата должны обеспечиваться определенные условия: длительность химической обработки, концентрации и температуры травильных растворов и промывных вод. Для снижения потребления кислот на травление производят регенерацию серно-плавикового раствора. После процесса регенерации растворы неорганических кислот используют повторно в цикле травления.

Для достижения поставленной цели был использован подход концепции бережливого производства DMAIC. Этот подход позволяет последовательно решать проблемы и совершенствовать бизнес-процессы с помощью статистики. При этом решение проблемы осуществляется в строго определенной последовательности: каждая буква в названии метода соответствует определенному этапу (рис. 3).

На первом этапе «Определение» (D) была сформулирована основная проблема, поставлены цели и задачи проекта, определены конкретные рамки.



Рис. 3. Подход концепции бережливого производства, DMAIC
Fig. 3. Lean Manufacturing Concept Approach, DMAIC

Рассматриваемая проблема заключалась в высоких экономических затратах на кислоты для травления.

На этапе «Измерение» (M) проводился сбор всех необходимых сведений о процессе, фиксировались текущие показатели, нуждающиеся в улучшении. С помощью инструментов бережливого производства, диаграммы Исикавы и причинно-следственной матрицы были определены корневые причины высоких затрат на процесс химической обработки труб. Далее по каждой определенной причине был разработан комплекс мероприятий.

На этапе «Анализ» (A) был проведен анализ эффективности действующих процессов регенерации травильных растворов и осветления труб из нержавеющей сталей.

Технологический процесс регенерации отработанного серно-плавикового раствора, содержащего ионы железа, представляет собой важный этап в восстановлении и повторном использовании кислот, что позволяет значительно снизить затраты на сырье и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Процесс регенерации начинают с понижения температуры отработанного травильного раствора, что является ключевым этапом в выделении кристаллов сульфата железа. Обычно это достигают путем охлаждения раствора, что приводит к снижению растворимости сульфата железа и, как следствие, к образованию кристаллов. Кристаллизация происходит благодаря изменению термодинамических условий, что позволяет ионам железа соединяться с сульфатными ионами и формировать устойчивые кристаллические структуры.

После того как кристаллы сульфата железа сформированы, они отделяются от оставшегося раствора на центрифуге. Центрифугирование — эффективный метод разделения твердых и жидких фаз, который использует центробежную силу для удаления жидкости из смеси. В результате получают концентрированный осадок сульфата железа (железный купорос), который может быть использован в дальнейшем для различных целей, например, в производстве удобрений или в водоочистке, и очищенный травильный раствор, который возвращают обратно в цикл и повторно используют для травления.

На схематичной технологической схеме процесса регенерации (рис. 4) представлены основные этапы: охлаждение отработанного раствора, кристаллизация сульфата железа, центрифугирование и отделение кристаллов от жидкости. Каждый из этих этапов требует контроля условий, таких как

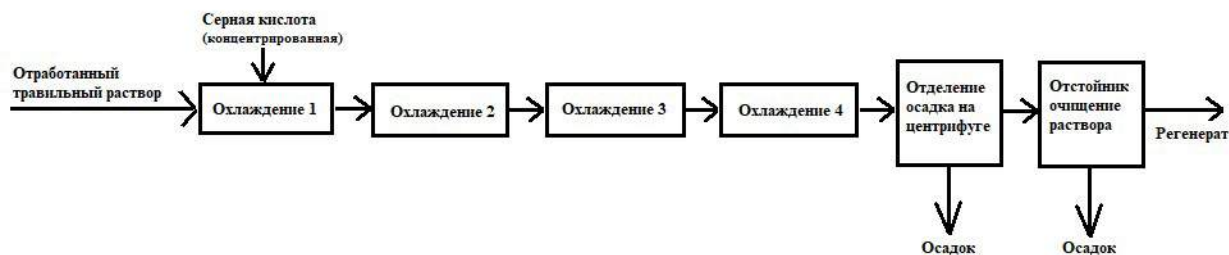


Рис. 4. Схематичная технологическая схема процесса регенерации
Fig. 4. Technological scheme of the regeneration process

температура и время обработки, концентрация кислот, чтобы обеспечить максимальную эффективность процесса и высокое качество конечного продукта.

Стоит отметить, что регенерация серно-плавикового раствора не только способствует экономии ресурсов, но и играет важную роль в экологической устойчивости производственных процессов.

С целью оценки эффективности процесса регенерации был проведён анализ на определение индекса способности процесса по ГОСТу Р 50779.44–2001 [11]. Анализ показал, что эффективность данного процесса находится на низком уровне, о чём говорит значение индекса способности процесса, равное меньше единицы (рис. 5). На значение индекса способности процесса повлияли такие факторы, как высокий разброс значений концентраций кислот в травильном растворе. Следовательно, требуемая остаточная концентрация примесей железа в очищенном растворе стабильно не обеспечивается. Для достижения требуемых значений остаточной концентрации примесей железа требуется частичная замена травильного раствора, в связи с чем расход кислот повышается.

С помощью регрессионного анализа были определены основные технологические параметры, влияющие на процесс регенерации, такие как содержание примесей железа в отработанном травильном растворе; концентрация серной кислоты в регенерируемом растворе; температура травильного раствора, поступающего на установку регенерации.

Следующим этапом был проведён анализ, направленный на оптимизацию режимов осветления труб из нержавеющей стали. Ежегодно осветлению подвергаются более 6000 труб из нержавеющей стали. К трубам из нержавеющей стали предъявляют повышенные требования, в частности, поверхность должна быть светлая, однородная и без загрязнений. С этой целью проводят операцию осветления в азотно-плавиковом растворе. При помощи инструмента бережливого производства статистического анализа был проведён анализ по разбросу значений концентраций плавиковой кислоты в растворе осветления. В результате был сделан вывод, что текущую технологию используют в достаточно широком интервале концентраций кислот. Разброс значений концентраций составляет более 20 г/л (рис. 6). Широкий разброс значений концентрации говорит о низкой управляемости процессом.

Ключевым этапом является «Совершенствование» (I). На основании анализа собранных статистических данных за несколько месяцев работы оборудования и проведенных опытных работ были подобраны оптимальные технологические режимы процесса регенерации, такие как содержание примесей железа в отработанном травильном растворе;

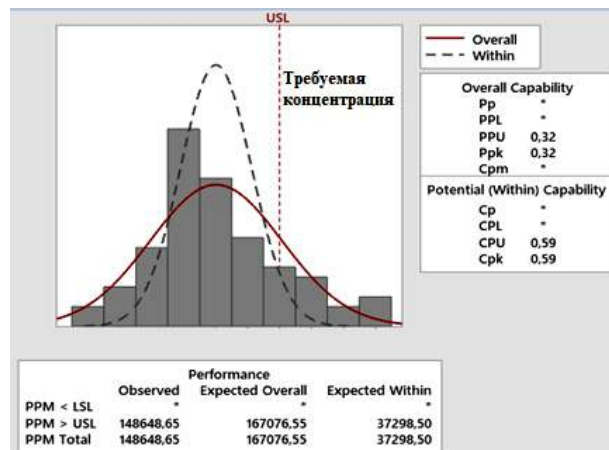


Рис. 5. Оценка стабильности процесса регенерации
Fig. 5. Assessment of the stability of the regeneration process

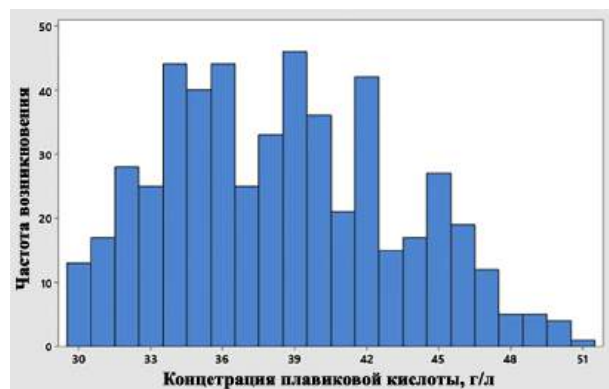


Рис. 6. Разброс концентрации плавиковой кислоты в растворе для осветления
Fig. 6. Range of hydrofluoric acid concentration in the clarification solution

ре; концентрация серной кислоты в очищенном растворе; температура отработанного травильного раствора, поступающего на установку регенерации; температура регенерированного раствора на выходе из установки. Исследование химизма процесса регенерации показало, что при повышении концентрации серной кислоты происходит ускорение реакции отделения примесей железа в регенерируемом растворе. Анализ собранных статистических данных является основным инструментом в бережливом производстве для определения причинно-следственных связей.

Для облегчения работы персонала подобранные оптимальные технологические режимы процесса регенерации внесены в стандартные операционные

Regression Equation

качество = $-5,29 + 0,1206 \text{ температура} + 0,2459 \text{ конц. плавиков. кислоты}$

Parameters

Response Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
качество	Target	1	7	10	1

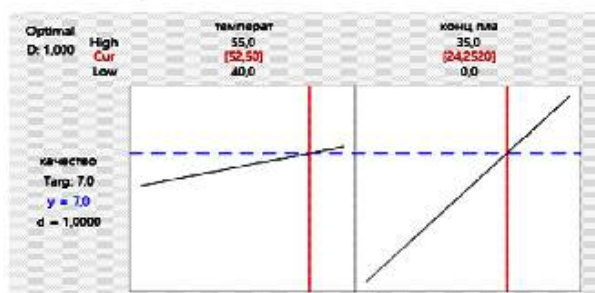


Рис. 7. Определение оптимальных параметров процесса осветления в Minitab

Fig. 7. Determining the optimal parameters of the lightening process in Minitab



Рис. 8. Качество поверхности осветлённых труб

Fig. 8. Surface quality of clarified pipes

процедуры, размещённые непосредственно на рабочих местах. Стандартные операционные процедуры представляют собой документ, включающий допустимые значения технологических параметров, необходимых для максимальной эффективности процесса. Данные мероприятия показывают применение такого инструмента бережливого производства, как «визуализация».

С целью обеспечения эффективного использования оборудования был использован элемент метода TRM и разработан стандарт ежесменной диагностики и оперативного обслуживания [12]. Указанный стандарт представлен в виде наглядной стандартной операционной процедуры, в которой описаны возможные неисправности оборудования и порядок действий персонала для предотвращения их возникновения.

Благодаря подобранной оптимальной технологии процесса регенерации (ускорению реакции отделения примесей железа в регенерируемом растворе) и разработанному стандарту ежесменной диагностики и оперативного обслуживания оборудования эффективность процесса регенерации увеличилась на 40 %.

Повторное использование восстановленных травильных растворов и, как следствие, снижение количества образующихся отходов способствуют снижению негативного влияния на окружающую среду и соблюдению норм экологической безопасности.

Также были реализованы мероприятия, направленные на оптимизацию режимов осветления труб из нержавеющей стали. С помощью инструмента «планирование эксперимента (DoE)» определены наиболее оптимальные параметры осветления труб из нержавеющей стали. При этом учитывалось получаемое качество продукции и обеспечение установленных требований потребителей [13]. При планировании эксперимента учитывались технологические параметры, такие как концентрации кислот в травильном растворе, температура травильного раствора и длительность процесса в их различных вариациях [14].

По результатам экспериментальных травлений, согласно построенному плану, было проведено математическое моделирование в программе Minitab. В результате оптимизации полученной математической модели определены рекомендуемые режимы ведения процесса осветления (рис. 7).

Подобранные режимы осветления обеспечили требуемое качество поверхности труб (рис. 8).

Заключительным этапом реализации алгоритма DMAIC является «Контроль» (C). Он состоит в оценке достижения поставленных целей для совершенствования процесса. После прохождения указанного этапа проект признают реализованным и завершают [15].

Для оценки результатов внедрённых мероприятий проводился анализ динамики изменения удельных расходов кислот. Анализ динамики внедрённых мероприятий является обязательным этапом фазы DMAIC «Контроль».

По результатам проведённого анализа удельный расход кислот был снижен более чем на 15 % (рис. 9).

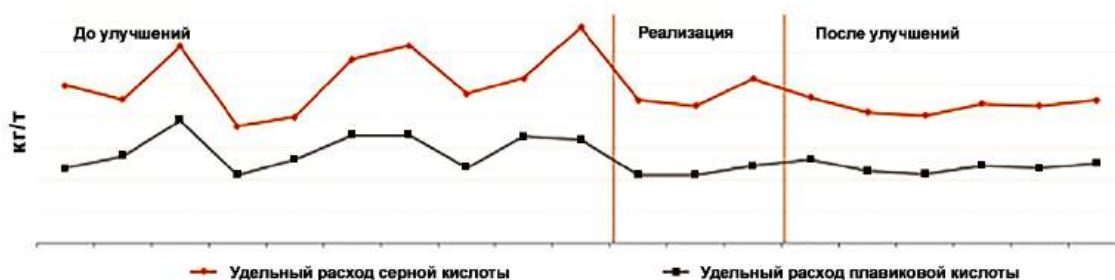


Рис. 9. Изменения удельного расхода серной и плавиковой кислот
Fig. 9. Changes in the specific consumption of sulfuric and hydrofluoric acids

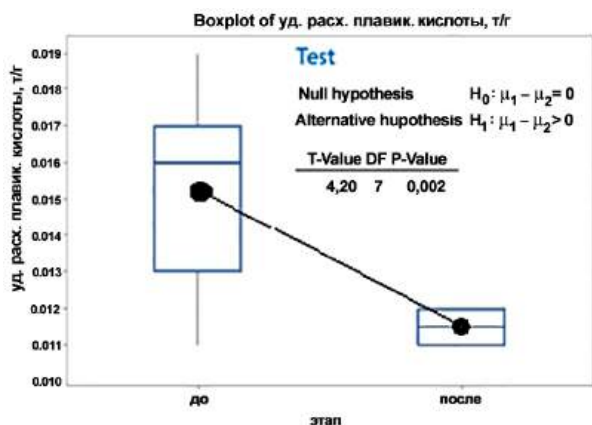


Рис. 10. Проверка значимости улучшений гипотезным тестом в Minitab

Fig. 10. Checking the significance of improvements with a hypothesis test in Minitab

С помощью инструментов анализа улучшений в программе Minitab была подтверждена значимость внесенных улучшений, что доказано гипотезным тестом (рис. 10).

На заключительном этапе все мероприятия, реализованные с помощью инструментов бережливого производства, были стандартизованы в технологической документации, что является обязательным заключительным этапом фазы DMAIC «Контроль».

По результатам оценки эффективности применения концепции бережливого производства для повышения эффективности процесса химической обработки труб был достигнут положительный экономический эффект.

Выводы

С целью повышения экономической эффективности производства и оптимизации используемых ресурсов были проведены комплексные исследования влияния различных факторов на эффективность процесса травления. В ходе работы определены ключевые факторы, такие как концентрация и температура травильных растворов, а также время протекания процесса травления. На основании данных факторов подобрана оптимальная технология химической обработки труб. С использованием инструментов бережливого производства указаны наиболее оптимальные технологические режимы процесса химической обработки.

Список источников / References

1. Вейдер М. Инструменты бережливого производства II: Карманное руководство по практике применения Lean. Москва: Альпина Бизнес Букс, 2017. 59 с.
2. Weider M. Instrumenty berezhlivogo proizvodstva II: Karmannoye rukovodstvo po praktike primeneniya Lean [Lean Manufacturing Tools II: A Pocket Guide to Lean Practice]. Moscow, 2017. 59 p. (In Russ.).
3. Просвирина Н. В., Тихонов А. И. Особенности управления производственным процессом промышленного предприятия на основе концепции бережливого производства // Московский экономический журнал. 2019. № 11. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10152. EDN: MAGNWW.
4. Prosvirina N. V., Tikhonov A. I. Osobennosti upravleniya proizvodstvennym protsessom promyshlennogo predpriyatiya na osnove kontseptsii berezhlivogo proizvodstva [Features of managing the production process of an industrial enterprise

based on the concept of lean manufacturing]. Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal. Moscow Economic Journal. 2019. No. 11. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10152. EDN: MAGNWW. (In Russ.).

3. Бельш К. В. Организация бережливого производства на промышленных предприятиях // Лин-технологии: Бережливое производство. 2018. № 5.

Belysh K. V. Organizatsiya berezhlivogo proizvodstva na promyshlennykh predpriyatiyakh [Organization of lean production at industrial enterprises]. Lin-tekhnologii: Berezhlivoye Proizvodstvo. LEAN-technology: Saving Production. 2018. No. 5. (In Russ.).

4. Мирошниченко М. А., Голобородько Е. О., Сарычева И. Н. Методология эффективного управления на основе принципов бережливого производства // Вестник Академии знаний. 2020. № 2 (37). С. 179–183. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10161. EDN: PGHANX.

Miroshnichenko M. A., Goloborod'ko E. O., Sarycheva I. N. Metodologiya effektivnogo upravleniya na osnove printsipov berezhlivogo proizvodstva [Effective management methodology based on the principles of lean manufacturing]. Vestnik Akademii znaniy. Bulletin of the Academy of Knowledge. 2020. No. 2 (37). P. 179–183. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10161. EDN: PGHANX. (In Russ.).

5. ГОСТ Р 56407 – 2023. Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. Введ. 01–02–2024. Москва: Русский Регистр, 2023. 12 с.

GOST P 56407 – 2023. Berezhlivoye proizvodstvo. Osnovnyye instrumenty i metody ikh primeneniya [Lean production. Basic tools and methods of use]. Moscow, 2023. 12 p. (In Russ.).

6. Ballé M., Jones D., Chaize J., Fiume O. The Lean Strategy: Using Lean to Create Competitive Advantage, Unleash Innovation, and Deliver Sustainable Growth. McGraw Hill, 2017. 304 p. ISBN 1259860426, 978-1259860423.

7. Итикава А., Такаги И., Такэбэ Ю. [и др.]. TPM в простом и доступном изложении / пер. с яп. А. Н. Стерляжников; под ред. В. Е. Растимешина, Т. М. Куприяновой. Москва: Стандарты и качество, 2008. 128 с.

Itikava A., Takagi I., Takebe Yu. [et al.]. TRM v prostom i dostupnom izlozhenii [TRM in a simple and accessible presentation] / trans. from Japanese A. N. Sterlyazhnikova; ed. by V. E. Rastimeshin, T. M. Kupriyanaova. Moscow, 2008. 128 p. (In Russ.).

8. Быстрая переналадка для рабочих / пер. с англ. А. Рыкова; ред. А. Нижельский. Москва: Институт комплексных стратегических исследований, 2009. 112 с. ISBN 978-1-5632L-25-0, 978-5-903148-28-8.

Bystraya perenaladka dlya rabochikh [Quick changeover for workers] / trans. from Engl. A. Rykova; ed. by Nizhelskiy. Moscow, 2009. 112 p. ISBN 978-1-5632L-25-0, 978-5-903148-28-8. (In Russ.).

9. Травление металла // Metalworking Industrial: справ. URL: <https://metalworkind.com/ru/spravochnik/materialovedenie/travlenie-metalla> (дата обращения: 13.03.2025).

Travleniye metalla [Etching of metal] // Metalworking Industrial. URL: <https://metalworkind.com/ru/spravochnik/materialovedenie/travlenie-metalla> (accessed: 13.03.2025). (In Russ.).

10. Ward A. C., Sobek D. K. Lean Product and Process Development. 2nd ed. Lean Enterprise Institute, Inc., 2020. 349 p. ISBN 9781934109434; 1934109436.

11. ГОСТ Р 50779.44–2001. Статистические методы. Показатели возможностей процесса. Основные методы расчёта. Введ. 01–07–2002. Москва: АО НИЦ КД, 2001. 16 с.

GOST P 50779.44-2001. Statisticheskiye metody. Pokazateli vozmozhnostey protsesssa. Osnovnyye metody rascheta [Statistical methods. Process capability characteristics. Basic methods for calculation]. Moscow, 2001. 16 p. (In Russ.).

12. Омельченко И. Н., Лазарев С. В. Модель системы управления качеством производства на основе принципов

производственной системы Тойота и учении Деминга // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 79–84. EDN: RVEDOZ.

Omel'chenko I. N., Lazarev S. V. Model' sistemy upravleniya kachestvom proizvodstva na osnove printsipov proizvodstvennoy sistemy Toyota i uchenii Deminga [Production quality management system model, basing on Toyota production system principles and Deming theory]. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2013. No. 9. P. 79–84. EDN: RVEDOZ. (In Russ.).

13. Исикава К. Японские методы управления качеством: моногр. / сокр. пер. с англ. / под ред. А. В. Гличева. Москва: Экономика, 1988. 214 с. ISBN 0-13-952433-9, 5-282-00114-4.

Ishikawa K. Yaponskiye metody upravleniya kachestvom [Japanese quality management methods] / abbreviated trans. from Engl. / ed. by A. V. Glichev. Moscow, 1988. 214 p. ISBN 0-13-952433-9, 5-282-00114-4. (In Russ.).

14. Хан Д., Хунгенберг Х. Планирование и контроль / пер. с нем. / под ред. Л. Г. Головача, М. Л. Лукашевича [и др.]. Москва: Финансы и статистика, 2015. 128 с.

Hahn D., Hungenberg H. Planirovaniye i kontrol' [Planning and control] / trans. from German / ed. by L. G. Golovach, M. L. Lukashevich [et al.]. Moscow, 2015. 128 p. (In Russ.).

15. Фалько С. Г., Орлов А. И. «Шесть сигм» как подход к совершенствованию бизнеса // Контроллинг. 2004. № 4 (12). С. 42–46. EDN: WNPZIG.

Falko S. G., Orlov A. I. «Shest' sigm» kak podkhod k sovershenstvovaniyu biznesa ["Six Sigma" as an approach to business improvement]. *Kontrolling*. 2004. No. 4 (12). P. 42–46. EDN: WNPZIG. (In Russ.).

ПРОКОПЕНКО Никита Дмитриевич, инженер-технолог лаборатории химической обработки труб и материалов АО «Волжский трубный завод», г. Волжский.

SPIN-код: 4489-4802

AuthorID (РИНЦ): 1288220

Адрес для переписки: nikita.prokopenko@tmk-group.com

МОРОЗОВА Марина Сергеевна, кандидат технических наук, начальник лаборатории химической обработки труб и материалов АО «Волжский трубный завод», г. Волжский.

SPIN-код: 5354-5360

AuthorID (РИНЦ): 624459

AuthorID (SCOPUS): 58554651000

Адрес для переписки: ms.morozova@tmk-group.com

ЧУБУКОВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник центральной заводской лаборатории АО «Волжский трубный завод», г. Волжский.

SPIN-код: 1442-9379

AuthorID (РИНЦ): 881253

AuthorID (SCOPUS): 57189297192

Адрес для переписки: mikhail.chubukov@tmk-group.com

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

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 14.10.2025.

PROKOPENKO Nikita Dmitriyevich, Engineer Technologist of the Laboratory for Chemical Processing of Pipes and Materials, JSC "Volga Pipe Plant", Volzhsky.

SPIN-code: 4489-4802

AuthorID (RSCI): 1288220

Correspondence address: nikita.prokopenko@tmk-group.com

MOROZOVA Marina Sergeyevna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory for Chemical Processing of Pipes and Materials, JSC "Volga Pipe Plant", Volzhsky.

SPIN-code: 5354-5360

AuthorID (RSCI): 624459

AuthorID (SCOPUS): 58554651000

Correspondence address: ms.morozova@tmk-group.com

CHUBUKOV Mikhail Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Central Plant Laboratory, JSC "Volga Pipe Plant", Volzhsky.

SPIN-code: 1442-9379

AuthorID (RSCI): 881253

AuthorID (SCOPUS): 57189297192

Correspondence address: mikhail.chubukov@tmk-group.com

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

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 14.10.2025.



УДК/UDC 621.317.39:543.712

DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-58-64

EDN: AHCSBY

Научная статья / Original article

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПО ИЗМЕРЕННОЙ ДОБРОТНОСТИ

Д. В. Половинка, Ю. В. Рублева, М. Н. Ивлев

Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
Россия, Луганская Народная Республика, 291034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А

В работе рассматриваются вопросы определения влагосодержания трансформаторного масла. Предложена система оперативного определения влагосодержания трансформаторного масла в процессе его эксплуатации. Получены рекуррентные аналитические зависимости емкости и активного сопротивления измерительного преобразователя с трансформаторным маслом от интегрального напряжения заряда и разряда. Задача вычисления емкости и активного сопротивления по рекуррентным формулам возложена на микроконтроллер в составе устройства регистрации напряжения.

Ключевые слова: трансформаторное масло, качество, методика испытаний, аппаратура, жидкий диэлектрик, добротность, функция Ламберта, микропроцессор.

Для цитирования: Половинка Д. В., Рублева Ю. В., Ивлев М. Н. Система контроля влагосодержания трансформаторного масла по измеренной добротности // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 58–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-58-64. EDN: AHCSBY.



© Половинка Д. В., Рублева Ю. В., Ивлев М. Н., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MOISTURE CONTENT CONTROL SYSTEM FOR TRANSFORMER OIL USING MEASURED Q-FACTOR

D. V. Polovinka, Yu. V. Rubleva, M. N. Ivlev

Lugansk Vladimir Dahl State University,
Russia, Lugansk People's Republic, Lugansk, Molodezhnyy Blk., 20A, 291034

This paper discusses the issues of determining the moisture content in transformer oil. A system for the rapid determination of the moisture content in transformer oil during its operation is proposed. Recurrent analytical relationships for the capacitance and active resistance of a measuring transducer with transformer oil as a function of the integral charge and discharge voltage have been derived. The task of calculating the capacitance and active resistance using these recurrent formulas is assigned to a microcontroller within the voltage recording device.

Keywords: transformer oil, quality, testing method, equipment, liquid dielectric, quality factor, Lambert function, microprocessor.

For citation: Polovinka D. V., Rubleva Yu. V., Ivlev M. N. Moisture content control system for transformer oil using measured Q-factor. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 58–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-58-64. EDN: AHCSBY.



© Polovinka D. V., Rubleva Yu. V., Ivlev M. N., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Влияние влаги на ухудшение электроизоляционных свойств трансформаторного масла (ТМ) и изоляционных материалов трансформатора исследовано и охарактеризовано достаточно полно [1–3].

Известные методы контроля влажности ТМ [1, 4, 5] обладают рядом недостатков и в большей части требуют лабораторного контроля.

Для оперативного определения влагосодержания ТМ предлагается система контроля, основанная на принципе высокочастотного измерения добротности масла. Основным элементом системы является датчик — емкостный измерительный преобразователь проточного типа, установленный на трансформаторе.

Влагосодержание ТМ существенно влияет на его диэлектрические свойства. Повышение влагосодержания приводит к снижению удельного электрического сопротивления из-за наличия воды в эмульгированном состоянии и к увеличению диэлектрической проницаемости масла, что вызывает увеличение ёмкости. Вода имеет высокую относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{воды}} \approx 80$ по сравнению с диэлектрической проницаемостью ТМ, у которого она составляет 2,2...2,4. Наличие влаги в ТМ увеличивает его среднюю диэлектрическую проницаемость ϵ . Поэтому емкость используемого коаксиального проточного конденсатора с размещённым в нем трансформаторным маслом, которое содержит определенное количество влаги, может быть определена как

$$C = 2\pi \cdot l \cdot \ln(r_{\text{нар.}} / r_{\text{внутр.}}) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{m_{\text{в}} \cdot \epsilon_{\text{в}} + m_{\text{м}} \cdot \epsilon_{\text{м}}}{m_{\text{в}} + m_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где l — длина коаксиального конденсатора; $r_{\text{нар.}}$ и $r_{\text{внутр.}}$ — наружный и внутренний радиус коаксиального конденсатора; $m_{\text{в}}$ и $m_{\text{м}}$ — масса воды в масле и масса чистого трансформаторного масла (без влаги); $\epsilon_{\text{в}}$ и $\epsilon_{\text{м}}$ — диэлектрическая проницаемость воды и трансформаторного масла; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, равная $10^{-9}/(36\pi)$.

1. Функциональная схема системы и процесс измерения добротности

Измерение добротности ТМ, находящегося в преобразователе, производится путем определения заряда, накопленного преобразователем с ТМ, как показано на рис. 1.

Принцип действия этой схемы состоит в следующем. Генератор $G1$ генерирует прямоугольные импульсы с частотой $f1$, которые поступают на измерительный преобразователь (ИП) через высокопрецизионное сопротивление $R1$. С момента подачи первого импульса на ИП ведется циклическое измерение напряжения на ИП устройством регистрации напряжения (УРН). Процесс заряда длится до появления отрицательного фронта импульса, после которого формируется пауза и происходит параллельное подключение высокопрецизионного резистора $R2$ ключом S . При этом начинается процесс разряда ИП через $R2$, для которого также ведется циклическое измерение напряжения на ИП. Этот процесс длится до появления положительного фронта импульса генератора, а затем все повторяется в цикле.

Поскольку конструкция измерительного преобразователя выполнена в виде коаксиального проточного конденсатора (рис. 2), то напряжение

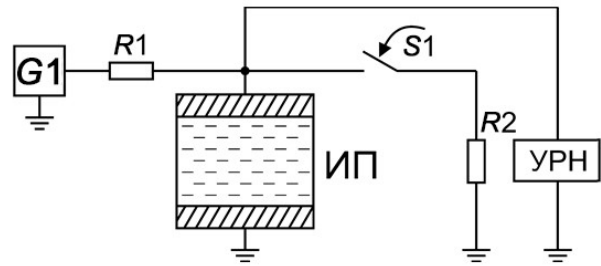


Рис. 1. Схема измерения добротности
Fig. 1. Q -factor measurement circuit

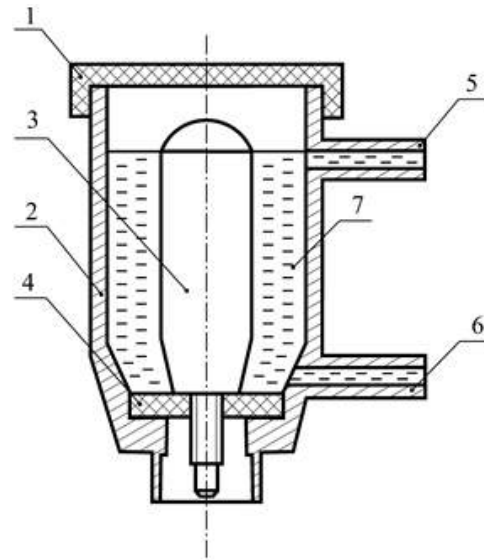


Рис. 2. Измерительный проточный коаксиальный преобразователь: 1 — крышка; 2 — корпус; 3 — электрод; 4 — изоляционная шайба; 5 — входной трубчатый канал; 6 — выходной трубчатый канал; 7 — трансформаторное масло

Fig. 2. Measuring flow-through coaxial transducer: 1 — cover; 2 — housing; 3 — electrode; 4 — insulating washer; 5 — inlet tubular channel; 6 — outlet tubular channel; 7 — transformer oil

на ИП, наполненном ТМ, будет изменяться по кривой 1, как показано на рис. 3.

Измерительный проточный коаксиальный преобразователь является составной конструкцией. Крышка 1, выполненная из плексигласа, накручивается по резьбе корпуса 2, который выполнен из бронзы. Внутри корпуса 2 устанавливается изоляционная шайба 4, на которой закреплен центральный электрод 3. Через входной трубчатый канал 5 в ИП подается ТМ 7, а через выходной трубчатый канал 6 оно выводится из ИП. Воздействующий сигнал (напряжение) подается на центральный электрод 4 и корпус 2.

При этом УРН, регистрирующее напряжение на ИП, должно измерять текущее напряжение с частотой намного выше частоты генератора $G1$, чтобы получить ступенчатую кривую 2, которая максимально близко повторяла бы кривую 1.

Резистор $R1$ должен быть подобран таким образом, чтобы максимальное значение на кривой заряда составляло 90–95 % от выходного напряжения генератора $G1$, а резистор $R2$ должен быть подобран так, чтобы минимальное значение на кривой разряда составляло 5–10 % от выходного напряжения

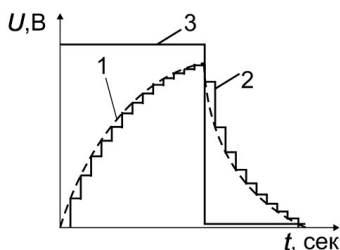


Рис. 3. Осциллограммы заряда и разряда емкости ИП:
1 — напряжение на ИП;
2 — напряжение, измеренное УРН;
3 — напряжение с выхода генератора G1

Fig. 3. Oscillograms of the power supply capacitance charge and discharge:
1 — voltage on the power supply;
2 — voltage measured by the voltage regulator;
3 — voltage from the output of generator G1

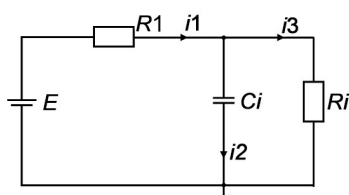


Рис. 4. Схема замещения процесса заряда ИП с трансформаторным маслом

Fig. 4. Equivalent circuit of the charging process of a power supply with transformer oil

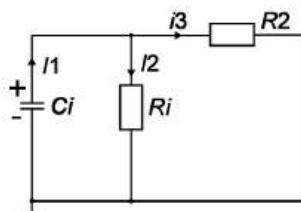


Рис. 5. Схема замещения процесса разряда ИП с трансформаторным маслом

Fig. 5. Equivalent circuit of the discharging process of a power supply with transformer oil

генератора G1. Это необходимо, так как при отклонении напряжений от указанных пределов при той же частоте $f1$ может снижаться точность контроля.

2. Схемы замещения для процесса заряда и процесса разряда

Добротность измерительного преобразователя с ТМ зависит от соотношения активной проводимости к реактивной. Таким образом, для определения добротности необходимо измерить емкостную и активную составляющие проводимости ИП с ТМ. Для этого вначале необходимо получить зависимость напряжения заряда и напряжения разряда от времени ($U_3 = f(t)$) и ($U_p = f(t)$). Измерение зависимостей напряжения заряда и напряжения разряда от времени производится в соответствии со схемой, показанной на рис. 1.

Полученные результаты будут непосредственно коррелировать с емкостью и активной проводимостью ИП с трансформаторным маслом. Однако необходимо получение обратных зависимостей емкости и активного сопротивления ИП от интегрального значения напряжения заряда и напряжения разряда $C_i = f(U_3, U_p)$ и $R_i = f(U_3, U_p)$. Поэтому были составлены схемы замещения для процесса заряда и процесса разряда.

Когда в течение 0,5 секунды происходит заряд емкости ИП с трансформаторным маслом, то цепь разряда отключена, а переходным сопротивлением ключа S1 и внутренним сопротивлением генератора G1 можно пренебречь. Принимаем, что в процессе заряда ИП генератор будет источником постоянного напряжения, поскольку процесс заряда по длительности равен времени импульса генератора G1 и равен 0,5 секунды. При указанных допущениях была получена схема замещения процесса заряда ИП с трансформаторным маслом, представленная на рис. 4.

Когда в течение 0,5 секунды происходит разряд емкости ИП с трансформаторным маслом, то цепь заряда отключена, а переходным сопротивлением ключа S1 можно пренебречь и считать, что конденсатор заряжен до своего максимального значения напряжения. При указанных допущениях была получена схема замещения процесса разряда ИП с трансформаторным маслом, представленная на рис. 5.

3. Расчет прямых и обратных аналитических зависимостей для процессов заряда и разряда

Расчет аналитических зависимостей для процесса заряда

Для определения зависимости напряжения заряда на ИП U_3 от емкости C_i и активного сопротивления R_i в схеме замещения, показанной на рис. 4, была составлена система уравнений по I и II законам Кирхгофа при нулевых начальных условиях [6–8]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 R_1 + \frac{1}{C_i} \int i_2 dt = E \\ i_1 R_1 + i_3 R_i = E \end{cases} \quad (2)$$

Для свободных токов система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 R_1 + \frac{1}{C_i} \int i_2 dt = 0 \\ i_1 R_1 + i_3 R_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Переходя к операторной форме, получаем [6–8]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ i_1 R_1 + \frac{i_2}{C_i p} = 0 \\ i_1 R_1 + i_3 R_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Решать полностью всю систему необязательно, поскольку нет необходимости в получении значений токов цепи, но следует определить зависимость

напряжения заряда от параметров ИП с трансформаторным маслом, поэтому составляем матрицу для определителя системы:

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 & \frac{1}{C_I p} & 0 \\ R_1 & 0 & R_I \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Из составленной матрицы находим характеристическое уравнение [6]:

$$\frac{R_1 + R_I + C_I \cdot p \cdot R_1 \cdot R_I}{C_I \cdot p} = 0. \quad (6)$$

Данное уравнение содержит только один корень, который не равен 0:

$$p = \frac{-R_1 - R_I}{R_1 \cdot R_I \cdot C_I}. \quad (7)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, можно рассмотреть процесс, который описывается уравнением для тока заряда конденсатора:

$$i_c = A_3 \cdot e^{pt}. \quad (8)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, также можно рассмотреть процесс заряда конденсатора, который описывается уравнением для напряжения на конденсаторе [7, 8]:

$$U_c = A \cdot (1 - e^{pt}). \quad (9)$$

Площадь под кривой заряда измерительного преобразователя определяется для напряжения:

$$S = A_3 \int (1 - e^{pt}) dt = A_3 \cdot \left(t - \frac{1}{p} \cdot e^{pt} \right). \quad (10)$$

Величину этой площади можно получить путем суммирования напряжений за время 0,5 секунды, пока происходит разряд, и умножив эту сумму на величину промежутка между измерениями dt :

$$A_3 \cdot \left(t - \frac{1}{p} \cdot e^{pt} \right) = dt \sum_{n=1}^m U_n. \quad (11)$$

Отсюда получим значение p , используя функцию Ламберта W [9]:

$$p = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_3 \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (12)$$

Поскольку корень характеристического уравнения равен $p = \frac{-R_1 - R_I}{R_1 \cdot R_I \cdot C_I}$, то, подставив (7) в (12), получаем следующее равенство:

$$\frac{-R_1 - R_I}{R_1 \cdot R_I \cdot C_I} = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_3 \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (13)$$

Поскольку в уравнении (13) присутствует два неизвестных C_I и R_I , то вычислить их значение станет возможным после получения равенства, такого же, как (13), но для процесса разряда. Выразим C_I и R_I друг через друга:

$$C_I = (R_1 + R_I) \times \frac{t}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 \cdot R_I}. \quad (14)$$

$$R_I = t \cdot \frac{R_1}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 \cdot C_I - t}. \quad (15)$$

В уравнениях (14) и (15) параметры C_I и R_I зависят друг от друга, и получить их решение без получения подобных аналитических зависимостей для процесса разряда не представляется возможным.

Расчет прямых и обратных аналитических зависимостей для процесса разряда

Для определения зависимости напряжения заряда на ИП U_p от емкости C_I и активного сопротивления R_I в схеме замещения, показанной на рис. 5, была составлена система уравнений по I и II законам Кирхгофа [6] при нулевых начальных условиях [7, 8]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ \frac{1}{C_I} \int i_1 dt + i_2 R_I = 0 \\ \frac{1}{C_I} \int i_1 dt + i_3 R_2 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Переходя к операторной форме, получаем [6]:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ \frac{i_1}{C_I p} + i_2 R_I = 0 \\ \frac{i_1}{C_I p} + i_3 R_2 = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Решать полностью всю систему не нужно, поскольку нет необходимости в получении значений токов цепи, но есть необходимость в получении зависимости напряжения заряда от параметров ИП с трансформаторным маслом, поэтому составляем матрицу для определителя системы:

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ \frac{1}{C_I p} & R_I & 0 \\ \frac{1}{C_I p} & 0 & R_2 \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Из составленной матрицы находим характеристическое уравнение [6]:

$$\frac{R_2 + R_I + C_I \cdot p \cdot R_2 \cdot R_I}{C_I \cdot p} = 0. \quad (19)$$

Данное уравнение имеет только один корень, который не равен 0:

$$p = \frac{-R_2 - R_I}{R_2 \cdot R_I \cdot C_I}. \quad (20)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, можно рассмотреть процесс, который описывается уравнением для тока разряда конденсатора:

$$i_c = A_p \cdot e^{pt} \quad (21)$$

Для корня, не имеющего мнимой части, также можно рассмотреть процесс разряда конденсатора, который описывается уравнением для напряжения на конденсаторе [7, 8]:

$$U_c = A_p \cdot e^{pt} \quad (22)$$

Площадь под кривой заряда измерительного преобразователя определяется для напряжения:

$$S = A_p \int e^{pt} dt = \frac{A_p}{p} \cdot e^{pt} \quad (23)$$

Величину этой площади можно получить путем суммирования напряжений за время 0,5 сек., пока происходит разряд, и умножив эту сумму на величину промежутка между измерениями dt :

$$\frac{A_p}{p} \cdot e^{pt} = dt \sum_{n=1}^m U_n. \quad (24)$$

Отсюда получим значение p , используя функцию Ламберта W [9]:

$$p = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_p \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (25)$$

Поскольку корень характеристического уравнения равен $p = \frac{-R_2 - R_I}{R_2 \cdot R_I \cdot C_I}$, то, подставив (20) в (25), получаем следующее равенство:

$$\frac{-R_2 - R_I}{R_2 \cdot R_I \cdot C_I} = -\frac{1}{t} \cdot W \left(-A_p \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right). \quad (26)$$

Откуда находим значение C_I и R_I :

$$C_I = (R_2 + R_I) \cdot \frac{t}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_2 \cdot R_I}. \quad (27)$$

$$R_I = t \cdot \frac{R_2}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_2 \cdot C_I - t}. \quad (28)$$

Полагая, что C_I неизменно и для процесса заряда, и для процесса разряда, приравняем (14) и (27):

$$\frac{(R_1 + R_I) \cdot t}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 \cdot R_I} = \frac{(R_2 + R_I) \cdot t}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_2 \cdot R_I}. \quad (29)$$

Поскольку максимальное напряжение заряда равно максимальному напряжению разряда, $A_3 = A_p$, то из (29) определяем активное сопротивление ИП:

$$R_I = -R_1 \cdot R_2 \times \frac{W \left(A \cdot \frac{t}{-A \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_{n3}} \right) - W \left(-A \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right)}{W \left(-A \cdot \frac{t}{A \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_n} \right) \cdot R_1 - W \left(-A \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right) \cdot R_2}. \quad (30)$$

Полагая, что R_I неизменно и для процесса заряда, и для процесса разряда, приравняем (15) и (28):

$$\frac{R_1 \cdot t}{W \left(-A_3 \cdot \frac{t}{A_3 \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_{n3}} \right) \cdot R_1 \cdot C_I - t} = \frac{R_2 \cdot t}{W \left(-A_p \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right) \cdot R_2 \cdot C_I - t}. \quad (31)$$

Поскольку максимальное напряжение заряда равно максимальному напряжению разряда, $A_3 = A_p$, то из (31) определяем емкость ИП:

$$C_I = -t \times \frac{R_1 - R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot \left(W \left(-A \cdot \frac{t}{A \cdot t - dt \cdot \sum_{n=1}^m U_{n3}} \right) - W \left(-A \cdot \frac{t}{dt \sum_{n=1}^m U_{np}} \right) \right)}. \quad (32)$$

Таким образом, сначала измеряется напряжение заряда U_{nz} и разряда U_{np} через фиксированный промежуток времени dt (равный времени одного преобразования АЦП [10]) за время заряда, равное времени разряда t , а именно 0,5 сек. Затем, зная R_1 и R_2 , с использованием функции Ламберта вычисляются R_1 по (30) и C_1 по (32). По указанным параметрам преобразователя вычисляется добротность по известной формуле:

$$Q = \omega R_1 C_1, \quad (33)$$

где ω — частота генератора G_1 , равная 1 Гц.

Следует заметить, что функция Ламберта вычисляется по рекуррентной формуле:

$$W_{j+1} = W_j - \frac{W_j e^{W_j} - x}{e^{W_j} (W_j + 1) - \frac{(W_j + 2)(W_j e^{W_j} + x)}{2W_j + 2}}, \quad (34)$$

где x — аргумент функции Ламберта [9]; W_j — значение вычисленной на предыдущей итерации функции Ламберта; W_{j+1} — значение вычисляемой на текущей итерации функции Ламберта.

Сначала задаются произвольным значением функции Ламберта [9], например, $W_j = 0$ вычисляется x по формуле:

$$x = W_j e^{W_j}. \quad (35)$$

Затем по (34) вычисляется следующее приближение для функции Ламберта W_{j+1} и происходит проверка: если $\Delta < W_{j+1} - W_j$, то $W_j = W_{j+1}$, то расчет функции повторяется снова.

Выводы

1. Разработанный метод определения добротности ИП по интегральной величине контролируемого напряжения заряда позволяет непосредственно через градуировочные характеристики связать величину добротности с влажностью трансформаторного масла.

2. Использование функции Ламберта в аналитических зависимостях $C_1 = f(U_3, U_p)$ и $R_1 = f(U_3, U_p)$ приводит к необходимости использования в устройстве контроля влажности трансформаторного масла микропроцессора, способного реализовать алгоритм решения этих рекуррентных формул.

Список источников / References

- СТО 34.01-23.1-001—2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Москва: ПАО «Россети», 2017. 42 с.
- СТО 34.01-23.1-001—2017. Ob'yem i normy ispytaniya elektrooborudovaniya [Scope and test standards electrical equipment]. Moscow, 2017. 42 p. (In Russ.).
- Сырцов А. И., Невзлин Б. И., Захарчук А. С., Джасим М. Д. Влияние влаги на свойства трансформаторного масла // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. 2011. № 11 (186). С. 385—387. EDN: WCABIB.
- Syrtsov A. I., Nevzlin B. I., Zakharchuk A. S., Dzhasim M. D. Vliyaniye vlagi na svoystva transformatornogo masla [Effect of humidity on the properties of transformer oil]. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Elektrotehnika i Energetika*. 2011. No. 11 (186). P. 385—387. EDN: WCABIB. (In Russ.).
- Аракелян В. Г. Диагностика состояния изоляции маслонаполненного оборудования по влагосодержанию масла //

Электротехника. 2004. № 3. С. 2—13. URL: <https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/a000065.html> (дата обращения: 12.04.2025).

Arakelyan V. G. Diagnostika sostoyaniya izolyatsii maslonapolnennogo oborudovaniya po vlagosoderzhaniyu masla [Diagnostics of the insulation of oil-filled electrical equipment on the basis of oil moisture content]. *Elektrotehnika*. 2004. No. 3. P. 2—13. URL: <https://npa.transform.ru/articles/html/06exploitation/a000065.html> (accessed: 12.04.2025). (In Russ.).

4. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Ридель А. В. Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и влияние на пробивную прочность жидкого диэлектрика // Промышленная энергетика. 2020. № 5. С. 18—24. DOI: 10.34831/EP.2020.49.26.003. EDN: SASCTX.

Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M., Ridel' A. V. Analiz obrazovaniya kapel' vody v transformatornom masle i vliyaniye na probivnyuyu prochnost' zhidkogo dielektrika [Analysis of water droplet formation in transformer oil and its effect on the breakdown strength of the liquid dielectric]. *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2020. No. 5. P. 18—24. DOI: 10.34831/EP.2020.49.26.003. EDN: SASCTX. (In Russ.).

5. Гиззатова И. Д., Козлов В. К., Валиуллина Д. М., Гиниятуллин Р. А. Определение влаги и примесей в трансформаторном масле модифицированным методом Фишера // Аналитика. 2019. Т. 9, № 3. С. 232—235.

Gizzatova I. D., Kozlov V. K., Valiullina D. M., Giniatul'lin R. A. Opredeleniye vlagi i primesey v transformatornom masle modifitsirovannym metodom Fishera [Determination of moisture and impurities in transformer oil by the modified Fischer method]. *Analitika. Analytics*. 2019. Vol. 9, no. 3. P. 232—235. (In Russ.).

6. Туранов А. Н. Новые методы диагностики и изучения механизмов деградации трансформаторных масел: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2021. 32 с.

Turanov A. N. Novyye metody diagnostiki i izucheniya mekhanizmov degradatsii transformatornykh masel [New methods for diagnosing and studying of mechanisms of the transformer oil degradation]. Kazan, 2021. 32 p. (In Russ.).

7. IEEE Standard IEC 60422—2013. Mineral insulating oils in electrical equipment — supervision and maintenance guidance. International Electrotechnical Commission (IEC). Geneva, Switzerland, 2013. 93 p.

8. Буланов А. П. Представление суммы рекуррентной формулы определения показателей обратной функции Ламберта в виде разложения на более простые суммы // Труды Математического центра имени Н. И. Лобачевского: материалы XIII Междунар. Казанской летней науч. шк.-конф. 2017. Т. 54. С. 79—82.

Bulanov A. P. Predstavleniye summy rekurrentnoy formuly opredeleniya pokazateley obratnoy funktsii Lamberta v vide razlozheniya na boleye prostyye summy [Decomposition of the sum of the recurrent formula for exponents of the inverse Lambert function into simpler sums]. *Trudy Matematicheskogo tsentra imeni N. I. Lobachevskogo. Proceedings of the Mathematical Center named after N. I. Lobachevsky*. 2017. Vol. 54. P. 79—82. (In Russ.).

9. Соколов В. В., Лукашук В. А. Вопросы оценки и обеспечения надежности силовых трансформаторов // Избранные труды / Соколов В. В.; сост. А. Г. Овсянников, В. Н. Осотов, В. Н. Бережной. Екатеринбург: Издат. дом «Автограф», 2010. С. 22—30.

Sokolov V. V., Lukashchuk V. A. Voprosy otsenki i obespecheniya nadezhnosti silovyykh transformatorov [Issues of the evaluation and reliability assurance of power transformers] // Izbrannyye trudy [Selected works] / Sokolov V. V.; comp. A. G. Ovsyannikov, V. N. Osotov, V. N. Berezhnoy. Ekaterinburg, 2010. P. 22—30. (In Russ.).

10. Sokolov V., Aubin J., Davydov V. [et al.]. Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation. *CJGRE*, 2018. 51 p. ISBN 9782858730360.

ПОЛОВИНКА Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика» Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля), г. Луганск.

SPIN-код: 1719-2629

AuthorID (РИНЦ): 1239534

Адрес для переписки: polovinka@mail.ru

РУБЛЁВА Юлия Викторовна, ассистент кафедры «Электроэнергетика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

Адрес для переписки: ryuliya_87@rambler.ru

ИВЛЕВ Михаил Николаевич, аспирант кафедры «Электроэнергетика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

SPIN-код: 3693-7170

AuthorID (РИНЦ): 1269026

Адрес для переписки: mi-ivlev218@yandex.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 21.10.2025.

POLOVINKA Dmitriy Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electrical Power Engineering Department, Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk.

SPIN-code: 1719-2629

AuthorID (RSCI): 1239534

Correspondence address: polovinka@mail.ru

RUBLEVA Yuliya Viktorovna, Assistant of the Electrical Power Engineering Department, Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk.

IVLEV Mikhail Nikolayevich, Postgraduate of the Electrical Power Engineering Department, Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk.

SPIN-code: 3693-7170

AuthorID (RSCI): 1269026

Correspondence address: mi-ivlev218@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 30.06.2025; approved after reviewing 29.09.2025; accepted for publication 21.10.2025.

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Ю. Н. Смыков, С. В. Горелов

Сибирский государственный университет водного транспорта,
Россия, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

В статье рассмотрены процессы формирования детерминированных провалов напряжения в автономных системах электроснабжения, в том числе при электроснабжении плавучих инженерных сооружений с берега. В качестве автономной системы электроснабжения представлена схема судовой электроэнергетической системы. Изложены результаты исследования предлагаемого способа управления, полученные в процессе имитационного моделирования детерминированных провалов напряжения при автономной генерации электрической энергии в среде SimInTech. Произведён анализ процессов формирования кондуктивной низкочастотной детерминированной электромагнитной помехи в сетях с низкими интегральными показателями (малое значение токов короткого замыкания) электрических сетей плавучих инженерных сооружений. Приведены сравнения между требованиями, предъявляемыми к показателям качества электрической энергии, вырабатываемой на плавучем инженерном сооружении и вырабатываемой береговыми энергоустановками. Предложен способ повышения качества электрической энергии за счет предварительного регулирования и подготовки электроэнергетической системы к приёму соизмеримой (мощной) нагрузки.

Ключевые слова: система электроснабжения, защита от минимального напряжения, система управления, провал напряжения, автономная энергосистема, электромагнитная совместимость, качество электрической энергии.

Для цитирования: Смыков Ю. Н., Горелов С. В. Процессы формирования и подавления детерминированных провалов напряжения в автономных системах электроснабжения // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 65–72. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-65-72. EDN: XJXVVK.



© Смыков Ю. Н., Горелов С. В., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROCESSES OF FORMATION AND SUPPRESSION OF DETERMINISTIC VOLTAGE FAILURES IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Yu. N. Smykov, S. V. Gorelov

Siberian State University of Water Transport, Russia, Novosibirsk, Schetinkina St., 33, 630099

The processes of formation of deterministic voltage failures in autonomous power supply systems, including the power supply of floating engineering structures from the shore, are considered. The scheme of the ship's electric power system is presented as an autonomous power supply system. The results of the study of the proposed control method obtained in the process of simulation of deterministic voltage failures during autonomous generation of electrical energy in the SimInTech environment are considered. The analysis of the processes of formation of conductive low-frequency deterministic electromagnetic interference in networks with low integral indicators (low value of short circuit currents) of electrical networks of floating engineering structures is carried out. Comparisons are provided between the requirements for quality indicators of electrical energy generated on a floating engineering structure and generated by onshore power plants. A method has been proposed to improve the quality of electrical energy through preliminary regulation and preparation of the electrical power system to receive a commensurate (powerful) load.

Keywords: power supply system, minimum voltage protection, control system, voltage drop, autonomous power system, electromagnetic compatibility, quality of electrical energy.



Введение

Распределительные сети плавучих инженерных сооружений имеют сложную разветвлённую структуру с большим количеством потребителей, от качественной работы которых зависит возможность безопасно и в необходимые сроки обеспечить или способствовать обеспечению перевозки грузов и пассажиров, а также выполнению иных государственных задач.

Основными отличительными особенностями электроснабжения плавучих инженерных сооружений является малая инерционность генерирующих мощностей, соизмеримость мощности источников электрической энергии и приёмников электрической энергии, широкое применение асинхронных электродвигателей в качестве привода машин и механизмов. Указанные отличительные особенности являются предпосылками к возникновению провалов напряжения как при автономной работе, так и при подключении электроэнергетической системы плавучего инженерного сооружения (судна) к береговой питающей сети. Из-за возникновения провалов напряжения происходит увеличение токов потребления электрических машин и перегрев последних, что приводит к снижению энергоэффективности, снижению срока службы или отказу, сбоям автоматизированных процессов и циклов работы электрооборудования, нарушениям работы защиты и автоматики, сбоям в работе микропроцессорной техники. Дополнительным фактором является сложность ремонта и/или замены в условиях эксплуатации судового электрооборудования, вызванная удалённым местонахождением судна, специализированным исполнением электрооборудования, ограничениями по монтажу и установке. Таким образом, тема исследования обладает высокой актуальностью, а с учётом возрастающей потребности в новых энерговооружённых судах, в том числе для освоения Арктики и развития Северного морского пути, актуальна в долгосрочной перспективе.

Согласно нормативным документам, при рассмотрении наличия кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения, в том числе детерминированной, необходимо обратить внимание на следующие показатели качества электрической энергии [1]:

1. Остаточное напряжение U , % — ниже 90 % опорного напряжения.
2. Длительность провала напряжения Δt_n — до 1 мин.

При этом опорное напряжение (при оценке провалов, прерываний напряжения и перенапряжений) считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания.

Интерес представляет процесс возникновения данной помехи в случае соразмерной нагрузки, подключение которой возможно спрогнозировать (детерминировать) в автономных системах электроснабжения, с последующим анализом значимых факторов и выработке методов подавления помехи.

Цель и объект исследования

Цель — провести анализ процессов формирования кондуктивной низкочастотной детерминированной электромагнитной помехи в сетях с низкими интегральными показателями (малое значение токов короткого замыкания) электрических сетей плавучих инженерных сооружений. Основная задача исследования — сформировать и определить пути подавления указанной помехи при автономном электроснабжении судов, а также при электроснабжении от береговой электрической сети.

В условиях удалённых северных территорий, а также при обустройстве новых портов и терминалов в качестве берегового источника электрической энергии может выступать автономная система электроснабжения. Как правило, используется дизельная или газопоршневая энергоустановка, что несёт в себе дополнительные факторы снижения качества электрической энергии в части возникновения и проникновения в судовую сеть кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи, в том числе по провалу напряжения. Дополнительные факторы снижения качества электрической энергии связаны со снижением времени реакции на изменения электроэнергетических параметров (газопоршневые энергоустановки) и относительно более значительное влияние наброса нагрузки, в сравнении с централизованной системой электроснабжения. Схема судового электроэнергетической системы представлена на рис. 1.

В процессе исследования проанализированы различия между требованиями к качеству электрической энергии, вырабатываемой на плавучем инженерном сооружении, и береговыми установками. Сравнение требований ГОСТ 32144–2013 и требований правил классификации и постройки судов внутреннего плавания Российского речного регистра (ПСВП РРР) к показателям качества электроэнергии представлены в табл. 1.

Так как в общем случае вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения вследствие подключения детерминированной нагрузки зависит от соотношения мощностей короткого замыкания в приёмной и передающей системах, то определяющим фактором возникновения указанной помехи является не абсолютное значение мощности детерминированного потребителя, а соотношение

$$\frac{\delta X_{\text{пр}}}{\delta X_n} \approx f \frac{S_{\text{к,п}}}{S_{\text{к,пр}}}, \quad (1)$$

где $\delta X_{\text{пр}}$, δX_n — кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха в приёмной и передающей системе, %; $S_{\text{к,п}}$, $S_{\text{к,пр}}$ — полные мощности трёхфазных коротких замыканий (КЗ) в этих системах, кВА.

Прежде всего отметим, что электромагнитная обстановка определяется n -ым количеством стационарных случайных процессов, обусловленных нестандартными показателями качества электрической энергии. Все эти случайные процессы форми-



1–8 — потребители электроэнергии: 1 — основные; 2 — резервные;

Fig. 1. Ship's electrical system diagram: 1-8 — power consumers:

Показатель качества электроэнергии

ванного воздействия указанных показателей качества электрической энергии.

Исчерпывающая информация о таком сложном случайном процессе содержится в его многомерной интегральной функции распределения

67

Указанная функция характеризует вероятность того, что в момент времени t_i случайная величина X_i не превысит определённого своего значения.

Многомерная дифференциальная функция распределения вероятности определяется по формуле

$$P_n(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n) = \frac{\partial^n F_n}{\partial X_1 \partial X_2 \dots \partial X_i \dots \partial X_n} \quad (3)$$

Для нормализации сложного электромагнитного процесса в автономных электроэнергетических системах необходимо подавить кондуктивные электромагнитные помехи (ЭМП), распространяющиеся по сетям. Осуществить это можно путём применения специальных мер по повышению помехозащищённости и помехоустойчивости автономной системы электроснабжения (АСЭС). Под помехозащищённостью понимается способность ослаблять действия кондуктивных ЭМП за счёт специальных помехозащитных средств (ПЗС), не относящихся к принципу действия или построения АСЭС. Помехоустойчивость (ПУ) означает способность электрической сети или системы сохранять заданное качество функционирования при воздействии кондуктивных ЭМП определённого уровня и в отсутствие специальных ПЗС. Повышение ПУ достигается параметрическими изменениями некоторых элементов функциональных узлов АСЭС для того, чтобы, помимо выполнения рабочих функций, эти элементы одновременно выполняли бы защитные функции.

С целью определения возможности параметрического изменения при формировании детерминированных провалов напряжения рассмотрим рис. 2, где представлен процесс в условиях подключения соразмерной нагрузки. Так как моменту подключения мощного потребителя, как правило, сопутствует процесс подготовки (например, запрос на разрешение запуска или предварительная продувка помещения перед подключением мощного грузового насоса и т.д.), то возникновение провала напряжения в данном случае следует считать детерминированным, а не случайным. Другим примером является подключение мощного электропривода, работающего в повторно кратковременном режиме, например, портального крана большой грузоподъёмности или электропривода плавкрана большой грузоподъёмности при электроснабжении от автономных береговых систем, при этом работа указанного приёмника электрической энергии также имеет циклы и закономерности.

Начало ЭМП по провалу напряжения и время длительности данной помехи рассмотрено на рис. 2.

Уравнение для определения минимального значения напряжения генератора при пуске асинхронного двигателя имеет следующий вид:

$$U_{\min} = U_{\text{уст}} + (U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}) \cdot e^{-t_{\min}/T_d} + K_2 \cdot K [t_{\min} - T_d(1 - e^{-t_{\min}/T_d})],$$

$$T_d' = T_{d0} \frac{x_{AB} + x_d'}{x_{AB} + x_d} \quad (4)$$

где T_d' — постоянная времени обмотки возбуждения генератора при замкнутой обмотке статора на сопротивление x_{AB} ; T_{d0} — постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора ге-

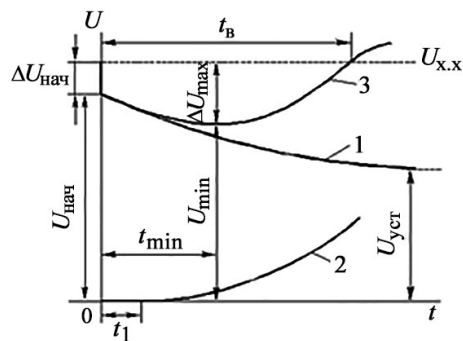


Рис. 2. Влияние наброса нагрузки:
1 — характеристика синхронного генератора, соответствующая понижению напряжения без воздействия регулятора напряжения;
2 — повышение выходного напряжения за счёт регулятора напряжения;
3 — результирующая кривая

Fig. 2. Effect of load surge:
1 — synchronous generator characteristic corresponding to voltage drop without voltage regulator intervention;
2 — output voltage increase due to voltage regulator;
3 — resulting curve

нератора, c ; K — коэффициент, характеризующий скорость нарастания напряжения возбуждения (для генераторов с самовозбуждением $K = 15 - 20$; $t_{\min}$ — время, при котором напряжение генератора имеет минимальное значение).

Время, при котором напряжение генератора имеет минимальное значение, определяется следующим образом:

$$t_{\min} = T_d' \left[\ln \left(\frac{U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}}{K_2 \cdot K \cdot T_d'} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

При подключении мощного нагруженного электропривода, имеющего асинхронный электродвигатель в качестве движителя, провал напряжения (снижение напряжения ниже 90 %) наблюдается при мощности электродвигателя 5 % от суммарной мощности работающих в параллель генераторов.

С целью снижения количества провалов напряжения и повышения качества электрической энергии представляет интерес заблаговременное повышение частоты питающего напряжения и уровня напряжения в пределах допустимых значений. Это возможно, в том числе, из-за большего коридора регулирования указанных параметров по сравнению с береговой централизованной энергосистемой (табл. 1).

Моделирование и анализ результатов

С учётом указанных предпосылок произведено моделирование в среде SimInTech.

SimInTech (Simulation In Technic) — среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев.

На рис. 3 и 4 представлено моделирование процесса возникновения провала напряжения без предварительной подготовки системы электроснабжения к набросу нагрузки. Соответственно, уровень напряжения выходит за нижнюю границу нормально допустимого значения 90 %, что говорит о наличии кондуктивной низкочастотной помехи в сети при подключении нагрузки и требует пода-

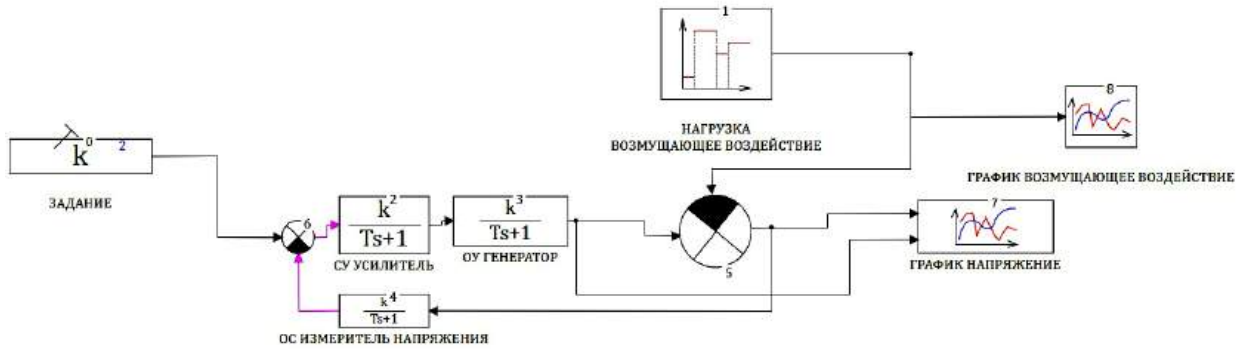


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования напряжения без превентивного регулирования
 Fig. 3. Structural diagram of a voltage regulation system without preventive regulation

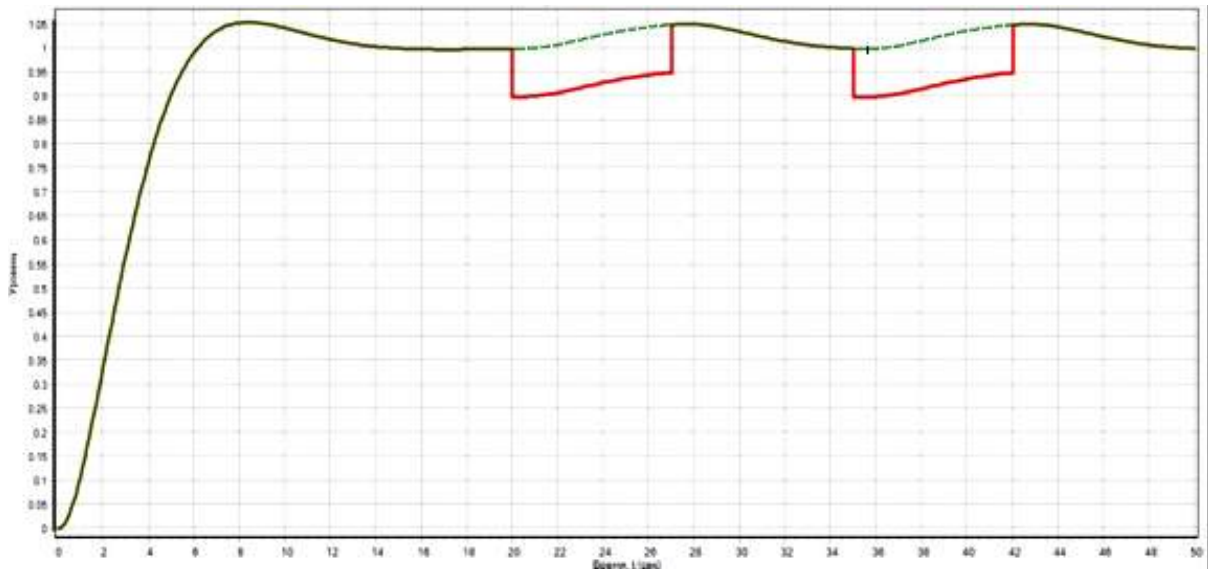


Рис. 4. Реакция на возмущающее воздействие системы регулирования напряжения без превентивного регулирования
 Fig. 4. Response to disturbance of a voltage regulation system without preventive regulation

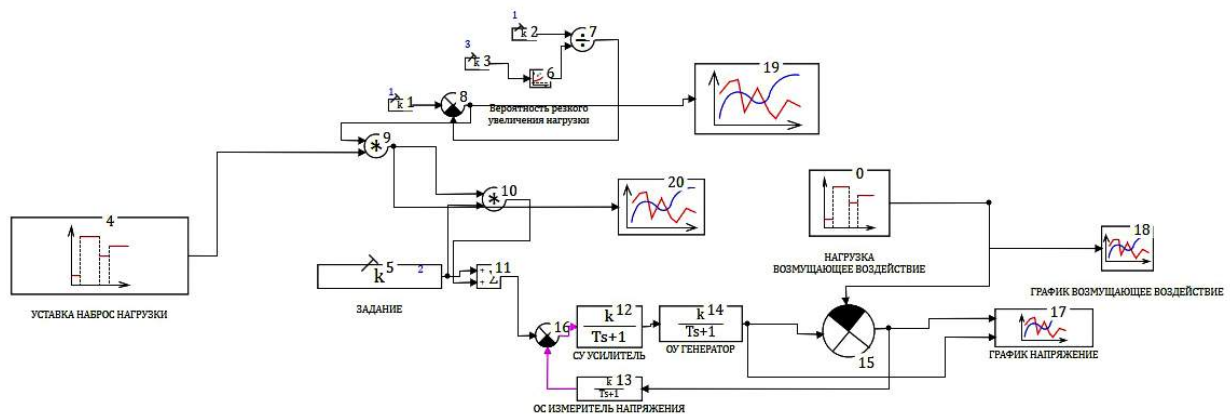


Рис. 5. Структурная схема системы регулирования напряжения с превентивным регулированием
 Fig. 5. Structural diagram of a voltage regulation system with preventive regulation

вления [2–4]. Во втором случае, указанном на рис. 5 и 6, система электроснабжения заранее, за 2 с до подключения мощного потребителя, получает возможность предварительной подготовки к приёму нагрузки за счёт увеличения уровня напряжения в пределах нормально допустимых значений.

Сплошной линией обозначено изменение напряжения сети в относительных единицах, а штриховой — выходное напряжение регулятора напряжения.

Аспекты влияния провала напряжения, а также средства и способы снижения уровня и времени провала напряжения представлены в работах [4–9]. Известно, что преимущество принципа систем регулирования «по возмущению» в том, что регулятор начинает действовать на более ранней стадии, когда появилась только лишь причина рассогласования, а отклонение регулируемого параметра ещё не началось. В электроэнергетике процессы быстрыны, поэтому эффективность системы регулиро-

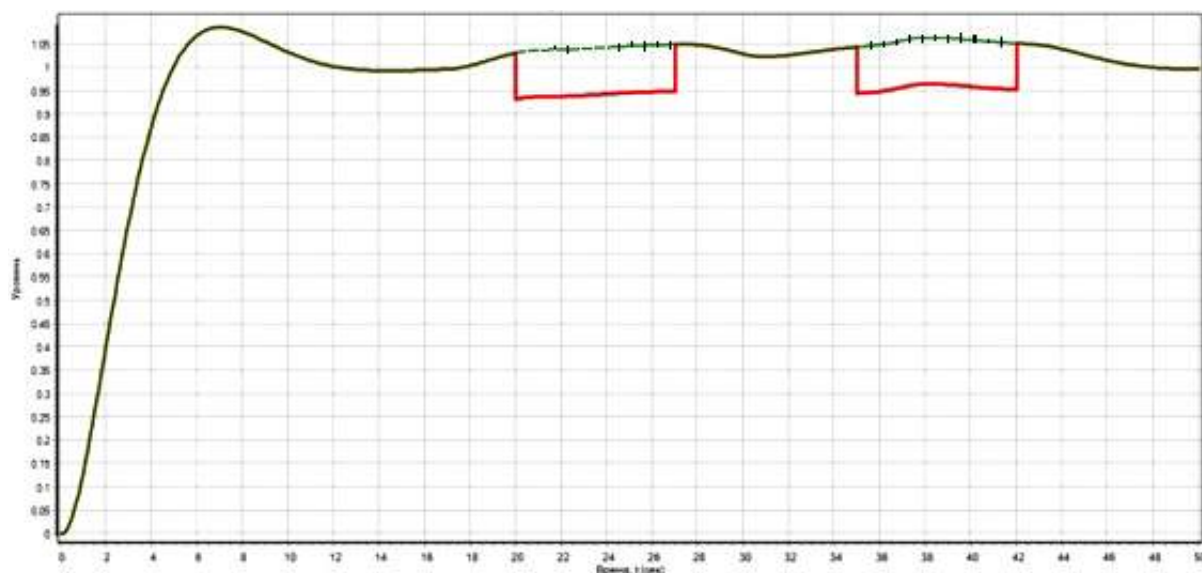


Рис. 6. Реакция на возмущающее воздействие системы регулирования напряжения с превентивным регулированием
Fig. 6. Response to disturbance of a voltage regulation system with preventive regulation

вания «по возмущению» снижается. Действительно, время возникновения возмущения (увеличение тока нагрузки) и время начала провала напряжения от указанного возмущения практически одновременны, поэтому оказать существенное воздействие на изменение электроэнергетических параметров АСЭС крайне затруднительно. Однако возможно применение принципа опережающего регулирования, базирующегося на детерминированности (обоснованности) вероятности возмущающего воздействия.

Рассмотрим пример: существует жёстко прописанный алгоритм запуска электропривода, включающий в себе продувку помещения, в котором он установлен (грузовой насос). Соответственно, запуск будет осуществлён с определённой выдержкой времени. Таким образом, появляется детерминированная вероятность подключения мощного потребителя. Зная соотношение мощностей подключаемого электродвигателя по отношению к мощности сети, вычисляем ожидаемую кондуктивную низкочастотную помеху по провалу напряжения. Далее следует заблаговременно увеличить напряжение (в пределах нормально допустимых значений, установленных ГОСТом 32133–2013), вырабатываемое генератором, с целью повышения качества электрической энергии в заданной АСЭС.

Вероятность появления возмущающего воздействия в локальной энергосистеме при электропитании судна с берега или ином случае, когда возможно и предусмотрено получение сигнала о процессе подготовки подключения мощного потребителя, определяется как

$$P_{\text{дет}}[x] = \begin{cases} 1 - e^{-x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где x — коэффициент детерминации. Тогда

$$t_{\text{мин опт}} = T_d' \ln \left(\frac{U_{\text{нач}} - U_{\text{уст}}}{K_2 \cdot K \cdot T_d'} + 1 \right) - \frac{20P_{\text{дет}}}{K}. \quad (7)$$

Таким образом, снижается количество провалов напряжения в целом, увеличивается остаточное

напряжение и снижается длительность детерминированных провалов напряжения, что повышает качество электрической энергии мобильных и стационарных АСЭС. Другой предпосылкой является уже используемая система последовательного запуска (sequential start). Однако работа осуществляется по отклонению, когда провал напряжения уже сформирован, что в условиях быстроизменяющихся электроэнергетических параметров энергосистемы автономных объектов недостаточно.

За последние десятилетия особенно остро проявляются вопросы межфакторного взаимодействия снижения показателей качества электрической энергии. Так, при наличии гармонических составляющих в сети, а также высокого уровня несимметрии с одновременным возникновением детерминированного провала напряжения, происходит консолидация негативного воздействия. Увеличение загрузки асинхронных двигателей на 10 % при несимметричных провалах напряжения приводит к увеличению напряжения статической устойчивости в среднем на 0,8 % и к уменьшению допустимой длительности провала напряжения по условию сохранения динамической устойчивости в среднем на 5,8 % [10].

Выводы

При рассмотрении динамики развития судовых и береговых электроэнергетических систем прослеживается системное увеличение применения микропроцессорных средств, частотного электропривода, программируемых логических контроллеров как в отдельных подсистемах, так и в рамках создания безэкипажных судов и производств с минимальным количеством обслуживающего персонала.

Высокая чувствительность указанных выше систем к низким показателям качества электрической энергии, в том числе к провалам напряжения, демонстрирует необходимость учёта процессов формирования и подавления детерминированных провалов напряжения при проектировании систем электроснабжения в процессе эксплуатации и модернизации, что ещё раз подчёркивает актуальность данного направления работы.

В исследовании были решены следующие задачи:

1. Представлены процессы формирования детерминированных кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех по провалу напряжения.

2. Предложен способ повышения качества электрической энергии за счет предварительного регулирования и подготовки электроэнергетической системы к приёму соизмеримой (мощной) нагрузки, а именно повышения уровня напряжения и уровня частоты электрической сети (для судовых электроэнергетических систем) в пределах нормально допустимых значений.

3. Разработана программа для ЭВМ «Система управления комплексом электроснабжения судов с берега» [11], обеспечивающая повышение качества электрической энергии в части провалов напряжения при подключении силовых потребителей мобильных объектов или судовой автоматизированной электроэнергетической системы к береговой автономной системе электроснабжения.

Также был выполнен анализ наличия кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи и снижения вероятности появления указанной помехи, в том числе за счёт предиктивного (заблаговременного) регулирования напряжения и частоты автономных энергосистем. Предиктивное регулирование напряжения и частоты позволяет снизить перегрузку электрических машин, повысить динамическую устойчивость асинхронных и синхронных электродвигателей [12], повысить устойчивость частотного электропривода к более длительным провалам напряжения за счёт накопления энергии в магнитном поле электрических машин и инерционного вращения всех электроприводов во время провала напряжения. Повышение качества электрической энергии за счёт применения указанного выше способа регулирования позволяет значительно уменьшить количество глубоких и продолжительных детерминированных провалов напряжения, которые вызывают выход из строя оборудования; снижение производительности; снижение уровня энергоэффективности и электробезопасности; потерю времени на повторное включение частотного электропривода; потерю времени и электроэнергии на восстановление электроэнергетических параметров АСЭС; снижение срока службы электрооборудования и т. д.

Применение предиктивного регулирования напряжения и частоты АСЭС в условиях возникновения детерминированных провалов напряжения имеет высокое практическое значение, что связано не только с большим количеством мобильных и стационарных объектов с автономными системами электроснабжения, но и с повышением востребованности применения (с целью обеспечения меньшего негативного влияния на экологию и относительно низкой стоимости вырабатываемой энергии) газопоршневых энергоустановок. Газопоршневые энергоустановки, в свою очередь, при резком изменении нагрузки имеют более длительный переходный процесс по сравнению с дизель-генераторными установками.

Список источников / References

1. ГОСТ 32144–2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

(EN 50160:2010, NEQ). Введ. 01–2014–07. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.

GOST 32144–2013. Mezhgosudarstvennyy standart. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya (EN 50160:2010, NEQ) [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 16 p. (In Russ.).

2. Ершов С. В., Пигалов М. С. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 12-1. С. 95–104. EDN: ZXGZJL.

Ershov S. V., Pigalov M. S. Analiz sredstv i sposobov ogranicheniya vliyaniya provalov napryazheniya [Analysis of means and methods of limitation of influence voltage fails]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*. 2017. No. 12-1. P. 95–104. EDN: ZXGZJL. (In Russ.).

3. Зацаринная Ю. Н., Маргулис С. М., Федотов Е. А. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10, № 1 (37). С. 55–63. EDN: UTFBTK.

Zatsarinnyaya Yu. N., Margulis S. M., Fedotov E. A. Primeneniye dinamicheskikh kompensatorov iskazheniy napryazheniya dlya povysheniya nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Application of dynamic compensators of voltage disturbances for increasing the reliability of the electrical supply system]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2018. Vol. 10, no. 1 (37). P. 55–63. EDN: UTFBTK. (In Russ.).

4. Шпиганович А. Н., Черных И. А., Шилов И. Г. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2006. № 1. С. 16–19.

Shpiganovich A. N., Chernykh I. A., Shilov I. G. Provaly napryazheniya v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh [Voltage dips in HV-networks] // *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya. News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*. 2006. No. 1. P. 16–19. (In Russ.).

5. Choi S. S., Li J. D., Vilathgamuwa D. M. A generalized voltage compensation strategy for mitigating the impacts of voltage sags/swells. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20, no. 3. P. 2289–2297. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848442.

6. Qian Y., Zhang Y., Chen M. [et al.]. Research and application of test system for voltage dip ride through capability of electrical equipments. *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. 2014. P. 168–172. DOI: 10.1109/CICED.2014.6991686.

7. Ершов М. С., Егоров А. В., Валов Н. В., Комков А. Н. Учет несимметрии питающего напряжения в системах защиты от потери устойчивости промышленных электротехнических систем // Промышленная энергетика. 2011. № 9. С. 22–24. EDN: OGHOPX.

Ershov M. S., Egorov A. V., Valov N. V., Komkov A. N. Uchet nesimmetrii pitayushchego napryazheniya v sistemakh za shchity ot poteri ustoychivosti promyshlennyykh elektrotekhnicheskikh system [Considering the asymmetry of the supply voltage in systems for protection against loss of stability of industrial electrical systems]. *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2011. No. 9. P. 22–24. EDN: OGHOPX. (In Russ.).

8. Егоров А. В., Новоселова Ю. В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях // Промышленная энергетика. 2000. № 11. С. 24–27. EDN: WFZUTD.

Egorov A. V., Novoselova Yu. V. Ustoychivost' asinkhronnykh mnogomashinnykh kompleksov pri vneshnikh mnogoparametricheskikh vozmushcheniyakh [Stability of asynchronous multi-machine complexes under external multi-parameter disturbances]. *Promyshlennaya energetika. Industrial*

Power Engineering. 2000. No. 11. P. 24–27. EDN: WFZUTD. (In Russ.).

9. Солодовников В. Е., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. Методика обработки статистической информации о провалах и кратковременных прерываниях напряжения в электрических сетях // *Электричество*. 2019. № 1. С. 4–16. EDN: VPXVGS.

Solodovnikov V. E., Tul'skiy V. N., Shamonov R. G. Metodika obrabotki statisticheskoy informatsii o provalakh i kratkovremennykh preryvaniyakh napryazheniya v elektricheskikh setyakh [A technique for processing statistical information for elaborating design solutions for protection from sags and short-term voltage interruptions]. *Elektrichestvo*. 2019. No. 1. P. 4–16. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-1-4-16. EDN: VPXVGS. (In Russ.).

10. Лосев Ф. А., Сушков В. В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98. EDN: UZEKWC.

Losev F. A., Sushkov V. V. Razrabotka metodiki i algoritmov otsenki vliyaniya nesimmetrichnykh provalov napryazheniya na ustoychivost' uzla asinkhronnoy elektrodvigatel'noy na gruzki neftnykh mestorozhdeniy [Technique and algorithms for induction electromotive loading node stability assessment of oil fields at three-phase unbalance voltage sag]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 4 (160). P. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98. EDN: UZEKWC. (In Russ.).

11. Переладов М. Е., Смыков Ю. Н. Система управления комплексом электроснабжения судов с берега: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2021. № 2022610299.

Pereladov M. E., Smykov Yu. N. Sistema upravleniya kompleksom elektrosnabzheniya sudov s berega [Control system for the ships power supply complex from the shore]: computer software. Moscow, 2021. No. 2022610299. (In Russ.).

12. Ершов М. С., Егоров А. В., Комков А. Н. Влияние несимметрии питающего напряжения на устойчивость синхронных двигателей // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина*. 2012. № 1 (266). С. 117–128. EDN: SCCVHT.

Ershov M. S., Egorov A. V., Komkov A. N. Vliyaniye nesimmetrii pitayushchego napryazheniya na ustoychivost' sinkhronnykh dvigateley [Effect of voltage unbalance on stability of synchronous motors]. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina. Proceedings of Gubkin University*. 2012. No. 1 (266). P. 117–128. EDN: SCCVHT. (In Russ.).

СМЫКОВ Юрий Николаевич, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ), г. Новосибирск.

SPIN-код: 4714-8430

AuthorID (РИНЦ): 892905

ORCID: 0009-0000-3976-6271

Адрес для переписки: sws1007@mail.ru

ГОРЕЛОВ Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и электротехника» СГУВТ, г. Новосибирск.

SPIN-код: 9751-7557

AuthorID (РИНЦ): 694545

ORCID: 0000-0001-9048-7104

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

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025; принята к публикации 20.10.2025.

SMYKOV Yuriy Nikolayevich, Associate Professor of the Electric Power Systems and Electrical Engineering Department, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

SPIN-code: 4714-8430

AuthorID (RSCI): 892905

ORCID: 0009-0000-3976-6271

Correspondence address: sws1007@mail.ru

GORELOV Sergey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electric Power Systems and Electrical Engineering Department, Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk.

SPIN-code: 9751-7557

AuthorID (RSCI): 694545

ORCID: 0000-0001-9048-7104

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

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 18.09.2025; accepted for publication 20.10.2025.

ОЦЕНКА РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ШИРОКИХ ПРЕДЕЛАХ И ДИАПАЗОНАХ

Б. Д. Табаров

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

В работе рассматривается влияние реакторно-тиристорного регулятора напряжения на синусоидальность тока и напряжения систем электроснабжения при стабилизации напряжения путём ступенчатого повышения напряжения в питающей сети до +16 % и снижении тока на нагрузке до –70 % от номинального уровня для оценки расширения функциональных возможностей заявляемого технического решения. Исследование проводилось в среде Matlab на имитационной модели системы электроснабжения с применением измерительных модулей, которое позволило оценить расширение функциональных возможностей предлагаемого регулятора напряжения с высокими энергетическими показателями. Работа проводилась при повышении напряжения в питающей сети до +16 % по шагам +2,5 %, а при снижении тока на нагрузке до –70 % по шагам –10 % от номинального значения. Полученные результаты подтверждают, что заявляемое устройство не искажает синусоидальность токов и напряжения питающей сети при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах. Результатами численных экспериментов также установлено, что новое техническое решение создает максимальное искажение напряжения в силовом трансформаторе и у потребителей электроэнергии на 3,75 % при повышении напряжения в питающей сети на +10 %, а при снижении тока нагрузки на –40% от номинального уровня. Значение несинусоидальности напряжения составляет 1,63 %, которые не выходят за нормально допустимые нормы, установленные отечественным и зарубежным ГОСТами. Наиболее целесообразной областью применения заявляемого технического решения является система электроснабжения, где при возникновении положительного отклонения и колебания напряжения в питающей сети и (или) отрицательного отклонения и колебания тока на нагрузке в широких пределах и диапазонах возникает необходимость поддерживать номинальное напряжение у потребителей на заданном уровне с высокой эффективностью.

Ключевые слова: система электроснабжения, тиристорный ключ, реактор, коэффициент несинусоидальности напряжения, коэффициент искажения синусоидальности тока, угол управления, широкий диапазон регулирования напряжения.

Для цитирования: Табаров Б. Д. Оценка расширения функциональных возможностей реакторно-тиристорного регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-73-81. EDN: OPMGVK.



© Табаров Б. Д., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

EVALUATION OF THE EXPANSION OF THE FUNCTIONALITY OF A REACTOR-THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR WITH WIDE VOLTAGE REGULATION RANGES

B. D. Tabarov

Komsomolsk-on-Amur State University, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Lenina Ave., 27, 681013

The paper considers the effect of a reactor-thyristor voltage regulator during voltage stabilization on the sinusoidal current and voltage of electrical complexes and systems with a stepwise increase in supply voltage to +16 % and a decrease in load current to –70 % of the nominal level. This study is conducted in the Matlab environment on a simulation model of electrical complexes and systems using measuring modules

to evaluate the expansion of the functionality of the proposed voltage regulator when voltage is stabilized in electrical complexes and systems with high energy performance. The study is conducted when the supply voltage is increased to +16 % in steps of +2.5 %, and when the load current is reduced to –70 % in steps of –10 % of the nominal value. The obtained research results confirm that the claimed device does not distort the sinusoidal voltage of the supply network and currents of electrical complexes and systems when regulating voltage in wide aisles and sub-ranges. The results of numerical experiments also showed that the new technical solution creates a maximum voltage distortion in the power transformer and in electricity consumers by 3.75 % when the voltage in the supply network increases by +10 % and by 1.63 % when the load current decreases by –40% of the nominal level, which does not exceed the normally permissible standards established by domestic and foreign GOST standards. The most appropriate area of application of the claimed technical solution is electrical engineering complexes and systems where it becomes necessary to maintain the voltage at a given level in the event of a positive deviation and voltage fluctuations in the supply network and negative deviations, and current fluctuations on the load in wide ranges with high efficiency.

Keywords: electrical engineering complexes and systems, thyristor switch, reactor, non-sinusoidal voltage coefficient, current sinusoidal distortion coefficient, angle control, wide range voltage regulation.

For citation: Tabarov B. D. Evaluation of the expansion of the functionality of a reactor-thyristor voltage regulator with wide voltage regulation ranges. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-73-81. EDN: OPMGVK.



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

Введение

Расширение функциональных возможностей и улучшение эффективности функционирования гибридных регуляторов напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах является актуальной задачей при стабилизации напряжения в системах электроснабжения на требуемом уровне [1–3]. Как известно из опыта эксплуатации систем электроснабжения (СЭС), описанных в ряде научных работ отечественных [1–4] и зарубежных [5–7] ученых, в последние годы традиционные механические регуляторы напряжения не удовлетворяют требованиям потребителей электроэнергии по сохранению номинального напряжения на заданном уровне в случае возникновения отклонений и колебаний тока и напряжения в питающей сети. Применение дополнительных устройств в целом позволило бы достигнуть высокого значения технико-экономических показателей электроустановок.

Учитывая необходимость поддержания напряжения в СЭС на заданном уровне, в частности у потребителей электроэнергии, и улучшения технико-экономических показателей традиционных механических регуляторов напряжения, отечественные и зарубежные ученые разработали гибридные регуляторы напряжения на основе компонентов силовой электроники для устранения недостатков известных технических решений [7–16]. Стоит подчеркнуть, что некоторые из этих гибридных регуляторов напряжения нашли области применения в реальной установке [8, 10, 13, 16]. В качестве положительных сторон гибридных регуляторов напряжения можно отметить расширение функциональных возможностей, улучшение точности функционирования и их быстродействия при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах [7–16].

Известные гибридные регуляторы напряжения, построенные на основе элементов силовой электроники, обладают также и недостатками, связанными с ухудшением качества электроэнергии и технико-экономических показателей электроустановки

за счет возникновения значительных гармонических составляющих токов и напряжений при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах [7–16], которые выходят за предельно допустимые нормы, установленные отечественными и зарубежными ГОСТами [17, 18]. Для компенсации гармонических составляющих токов и напряжений ученые предлагают рассматривать применение фильтрокомпенсирующего устройства, в результате чего не только усложняется работа и ухудшаются технико-экономические показатели СЭС, но и снижается надежность работы электрооборудования.

Автором статьи на основе проведения исследований и получения аналитических обзоров информационных источников, а также опыта эксплуатации существующих гибридных регуляторов напряжения разработано новое техническое решение [19], алгоритмы и способы его управления [20] для устранения недостатков традиционных механических и гибридных регуляторов напряжения с высокой эффективностью.

Целью работы является оценка расширения функциональных возможностей и эффективности функционирования предлагаемого технического решения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах.

Для достижения поставленной цели в рамках данного исследования ставились и решались следующие задачи:

- 1) на основе функциональной схемы, представленной в работе [19], разработать блочно-модульную модель СЭС с применением измерительных модулей [21] для проведения исследования и оценки расширения функциональных возможностей, а также для эффективности функционирования предлагаемого регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;
- 2) исследовать и оценить влияние предлагаемого технического решения на синусоидальность напряжений СЭС при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;

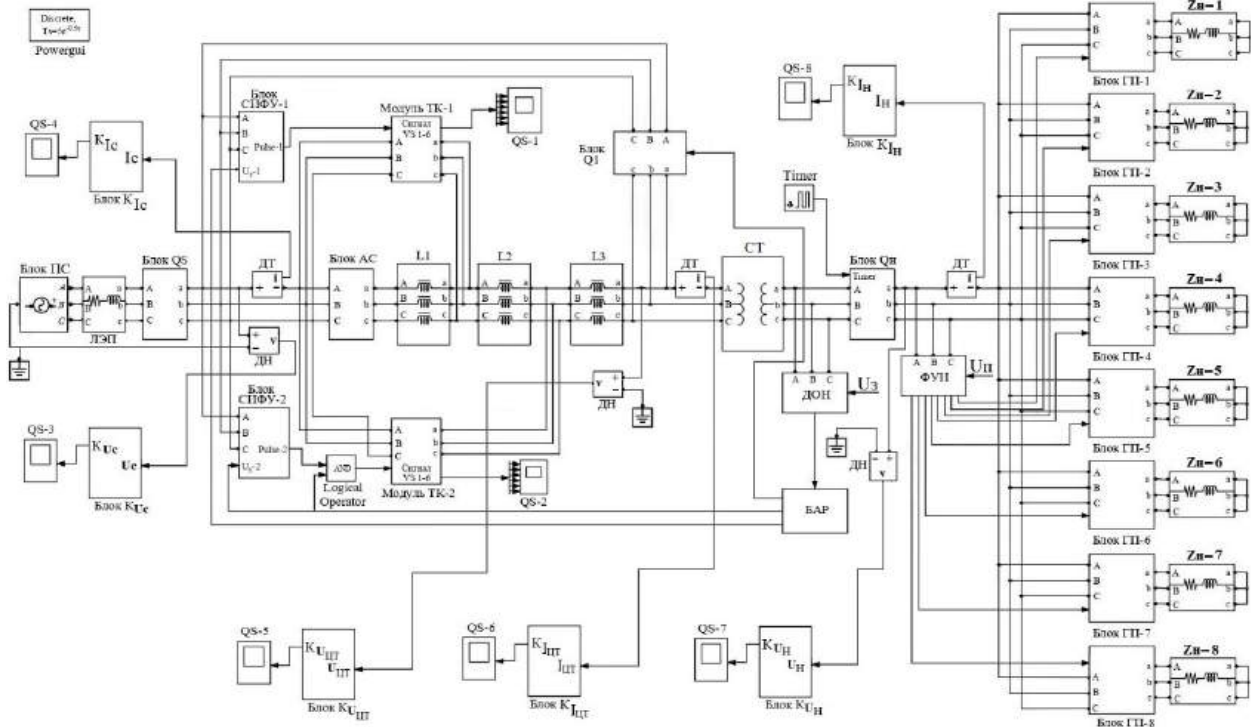


Рис. 1. Имитационная модель системы электроснабжения с новым реакторно-тиристорным регулятором напряжения и измерительными модулями: ПС — блок питающей сети; ЛЭП — линии электропередачи; QS — блок разъединителя; АС — блок контактора; L1, L2, L3 — основной, промежуточный, дополнительный реакторы; ТК-1, ТК-2 — модули основных и дополнительных тиристорных ключей; СИФУ-1, СИФУ-2 — блоки системы импульсно-фазового управления; Q1 — блок сетевого выключателя; СТ — силовой трансформатор; ДОН, БАР — блоки датчиков отклонения напряжения и авторегулирования; QF — блок автоматического выключателя; ФУИ — блок формирователя управляющих импульсов гибридных пускателей; ГП-1, ГП-2, ГП-3 — блоки гибридных пускателей нагрузок; Z_{n-1}, Z_{n-2}, Z_{n-3} — блоки активно-индуктивных нагрузок; K_{лпс}, K_{лст}, K_{лн} — блоки вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети, силового трансформатора и нагрузки; K_{лс}, K_{лст}, K_{лн} — блоки вычисления коэффициента искажения синусоидальности тока питающей сети, силового трансформатора и нагрузки

Fig. 1. Simulation model of the power supply system with a new reactor-thyristor voltage regulator and measuring modules: ПС — supply network unit; ЛЭП — power transmission lines; QS — disconnector unit; АС — contactor unit; L1, L2, L3 — main, intermediate, additional reactors; ТК-1, ТК-2 — modules of the main and additional thyristor switches; СИФУ-1, СИФУ-2 — pulse-phase control system units; Q1 — mains switch unit; СТ — power transformer; ДОН, БАР — voltage deviation and auto-regulation sensor units; QF — circuit breaker unit; ФУИ — block for generating control pulses of hybrid starters; ГП-1, ГП-2, ГП-3 — blocks of hybrid load starters; Z_{n-1}, Z_{n-2}, Z_{n-3} — blocks of active-inductive loads; K_{лпс}, K_{лст}, K_{лн} — blocks for calculating the coefficient of non-sinusoidal voltage of the supply network, power transformer and load; K_{лс}, K_{лст}, K_{лн} — blocks for calculating the coefficient of distortion of the sinusoidal current of the supply network, power transformer and load

3) исследовать и оценить влияние заявляемого устройства на синусоидальность токов СЭС при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;

4) получить осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений на разных участках СЭС, иллюстрирующие возникновение несинусоидальности токов и напряжений при стабилизации напряжения в СЭС.

Разработка имитационной модели системы электроснабжения с измерительными блоками

Для проведения исследования и оценки расширения функциональных возможностей реакторно-тиристорного регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах в среде Matlab разработана блочно-модульная имитационная модель СЭС с измерительными блоками, позволяющая вычислить коэффициенты несинусоидальности напряжения и искажения синусоидальности тока при стабилизации напряжения. Модель представлена на рис. 1.

Для вычисления коэффициента несинусоидальности токов СЭС измерительные блоки подключены к питающей сети (K_{лпс}, K_{лс}), силовому трансформатору

ру (K_{лст}, K_{лст}) и нагрузке (K_{лн}, K_{лн}). Измерительные блоки вычисления несинусоидальности напряжений (K_{лп}) и искажения синусоидальности токов (K_л) СЭС, подключенные к имитационной модели исследуемого объекта, разработаны в среде Matlab [21] на основе ниже представленных формул.

Измерительный блок вычисления несинусоидальности напряжения (K_{лп}) разработан в среде Matlab по формуле:

$$K_{лп} = \frac{U_{\Sigma}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U_{Σ} — действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения; U_1 — действующее значение первой гармоники напряжения.

Действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения зависит от действующих значений исследуемого напряжения и первой гармоники напряжения, которое определяется по следующему выражению:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U^2 - U_1^2}, \quad (2)$$

где U — действующее значение исследуемого напряжения.

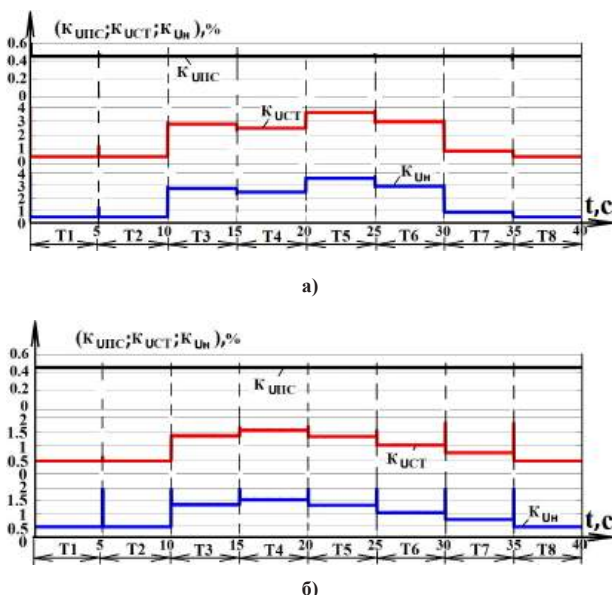


Рис. 2. Осциллограммы результатов исследования коэффициента несинусоидальности напряжения: а — при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 %; б — при снижении тока нагрузки до -70 % от номинального значения

Fig. 2. Oscillograms results of a study of the non-sinusoidal voltage coefficient: а — with a stepwise increase in the supply voltage to +16%; б — with a decrease in the load current to -70% of the nominal value

Измерительный блок вычисления искажения синусоидальности тока (K_i) создан по формуле [21]:

$$K_i = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad (3)$$

где $I_{(1)}$ — действующее значение первой гармоники тока; I — действующее значение исследуемого тока.

Результаты исследования влияния предлагаемого технического решения на синусоидальности токов и напряжений системы электроснабжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах

Исследование влияния предлагаемого технического решения на синусоидальности токов и напряжений СЭС проводилось при повышении напряжения в питающей сети до +16 % и снижении тока на нагрузке до -70 % от номинального значения. Как отмечалось выше, в рамках данной исследовательской работы рассматривается повышение напряжения в питающей сети до +16 % по шагам +2,5 %, а снижение тока на нагрузке до -70 % по шагам -10 % от номинального уровня. Ступенчатое повышение напряжения в питающей сети по шагам +2,5 % и снижении тока на нагрузке по шагам -10 % от номинального значения иллюстрируются на осциллограммах рис. 2—5 интервалами времени T2—T8. Важно подчеркнуть, что интервал времени T1 иллюстрирует работу СЭС при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки. В [19, 20] более подробно рассматривалась стабилизация напряжения в СЭС с помощью предлагаемого устройства при ступенчатом изменении напряжения в питающей сети и тока на нагрузке.

Ниже приведены количественные оценки по улучшению функционирования предлагаемого регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах.

На осциллограммах рис. 2 приведены полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения на разных участках СЭС при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке до -70 % (рис. 2б) относительно номинального уровня. На осциллограммах рис. 2 и рис. 3 приведены соответствующие электрические параметры, такие как мгновенные значения токов и напряжений питающей сети ($i_{\text{ПС}}$ и $u_{\text{ПС}}$), силового трансформатора ($i_{\text{СТ}}$ и $u_{\text{СТ}}$) и нагрузки ($i_{\text{Н}}$ и $u_{\text{Н}}$), действующие значения напряжения нагрузки ($U_{\text{Н}}$), а также коэффициенты несинусоидальности напряжения питающей сети $K_{\text{УПС}}$, силового трансформатора $K_{\text{УСТ}}$ и активно-индуктивной нагрузки $K_{\text{Ун}}$. Результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети $K_{\text{УПС}}$ подтверждают, что предлагаемое техническое решение стабилизирует напряжение исследуемого объекта на заданном уровне, не искажает синусоидальность напряжения питающей сети при возникновении отклонений и колебаний напряжения и тока нагрузки.

Предлагаемое техническое решение также не искажает синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки (интервал времени T1), повышении напряжения в питающей сети на +2,5 % и снижении тока на нагрузке на -10 % от номинального уровня (интервал времени T2), а также при повышении напряжения в питающей сети на +16 % и снижении тока на нагрузке на -70 % (интервал времени T8) относительно номинального значения. Стабилизируя напряжение на номинальном уровне, устройство незначительно искажает синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки на интервале времени T3—T7. В конце интервала времени T2 и начале интервала времени T3 напряжение в питающей сети повышается на +5 % (рис. 2а). Ток на нагрузке снижается на -20 % (рис. 2б) от номинального уровня и создает необходимость изменения углов управления, проводящих состояний тиристорных ключей для создания падения напряжения на индуктивных сопротивлениях соответствующих реакторов, в результате чего напряжение в СЭС поддерживается на заданном уровне, создавая при этом несинусоидальности напряжения в силовом трансформаторе и на нагрузке на 2,8 % (рис. 2а) и 1,48 % (рис. 2б).

Интервал времени T4 иллюстрирует влияние заявляемого устройства на синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки при повышении напряжения в питающей сети на +7,5 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на -30 % (рис. 2б) от номинального значения. Предлагаемое устройство на этом интервале времени искажает синусоидальность напряжения силового трансформатора и нагрузки на 2,45 % (рис. 2а) и 1,5 % (рис. 2б). Коэффициенты несинусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки на интервале времени T5 составляют 3,6 % (рис. 2а) и 1,35 % (рис. 2б). Здесь устройство стабилизирует напряжение в СЭС при повышении напряжения в питающей сети на +10 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на -40 % (рис. 2б) от номинального уровня [19].

На интервалах времени T6 и T7 коэффициенты несинусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки стремятся к нулю. Из интервала времени T6 видно, что коэффициенты

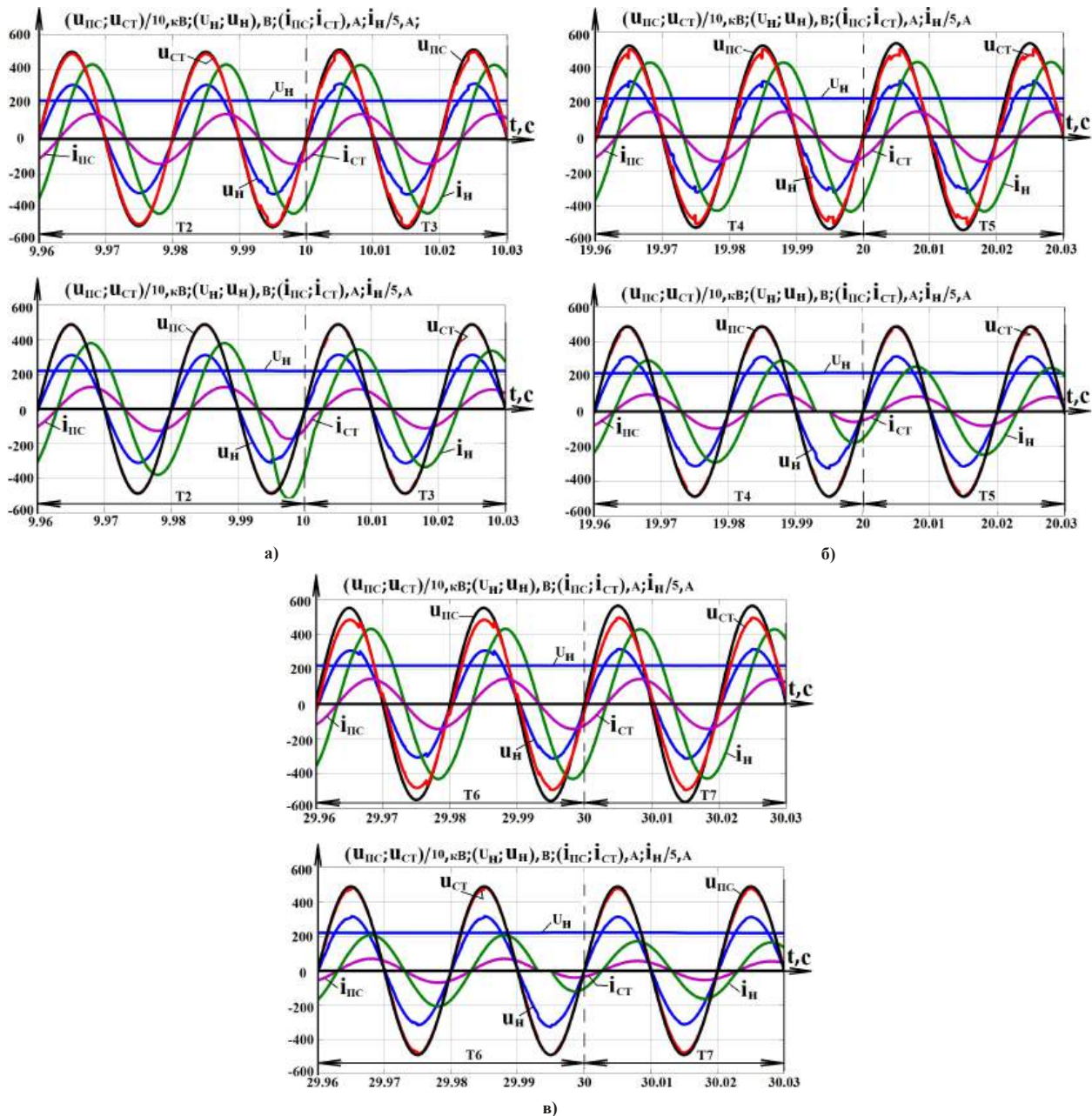


Рис. 3. Фрагменты осциллограмм токов и напряжений при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах:
а-в — при повышении напряжения питающей сети (сверху) и снижении нагрузки (снизу)
Fig. 3. Fragments of waveforms of currents and voltages during voltage regulation in wide ranges and ranges:
а-в — when the supply voltage increases (above) and the load decreases (below)

несинусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки на этом интервале времени составляет 3 % (рис. 2а) и 1 % (рис. 2б). Устройство на этом интервале времени поддерживает напряжения в СЭС на номинальном значении при повышении напряжения в питающей сети на +12,5 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на -50 % (рис. 2б) относительно номинального уровня [19]. Новое техническое решение на интервале времени Т7, то есть при повышении напряжения в питающей сети на +15 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на -60 % (рис. 2б), поддерживая номинальное значение напряжения на заданном уровне, искажает синусоидальность напряжения силового трансформатора и нагрузки на 0,87 % (рис. 2а) и 0,75 % (рис. 2б) соответственно. На осциллограммах рис. 2 время указано в секундах.

Как подтверждают полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности на-

пряжения на разных участках СЭС, предлагаемое техническое решение, стабилизируя напряжения в СЭС на заданном уровне, создает максимальный уровень несинусоидальности напряжения в силовом трансформаторе и нагрузки на интервалах времени Т5 (рис. 2а) и Т4 (рис. 2б). Эти значения не выходят за нормально допустимые нормы, установленные отечественными [17] и зарубежными [18] ГОСТами.

Для иллюстрации возникновения искажения синусоидальности в кривых напряжениях СЭС на рис. 3 приводятся фрагменты мгновенных значений токов и напряжений. Как отмечалось выше, на этих фрагментах приведены мгновенные значения токов и напряжений питающей сети ($i_{ПC}$ и $u_{ПC}$), силового трансформатора (i_{CT} и u_{CT}) и нагрузки ($i_{Н}$ и $u_{Н}$), а также действующие значения напряжения нагрузки ($U_{Н}$). На рис. 3 фрагменты, представленные сверху, иллюстрируют изменение величины

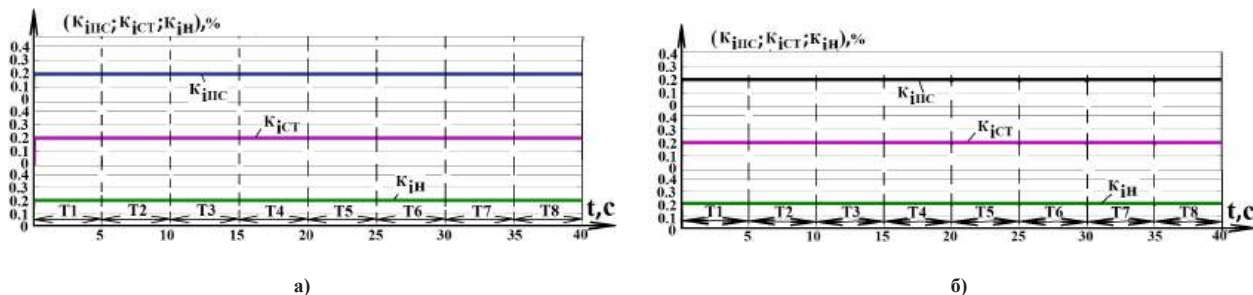


Рис. 4. Осциллограммы результатов исследования коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения: а — при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 %; б — при снижении тока нагрузки до –70 % от номинального значения
Fig. 4. Oscillograms results of a study of the distortion coefficient of the sinusoidal current in different sections of the power supply system: а — with a stepwise increase in the supply voltage to +16%; б — with a decrease in the load current to –70% of the nominal value

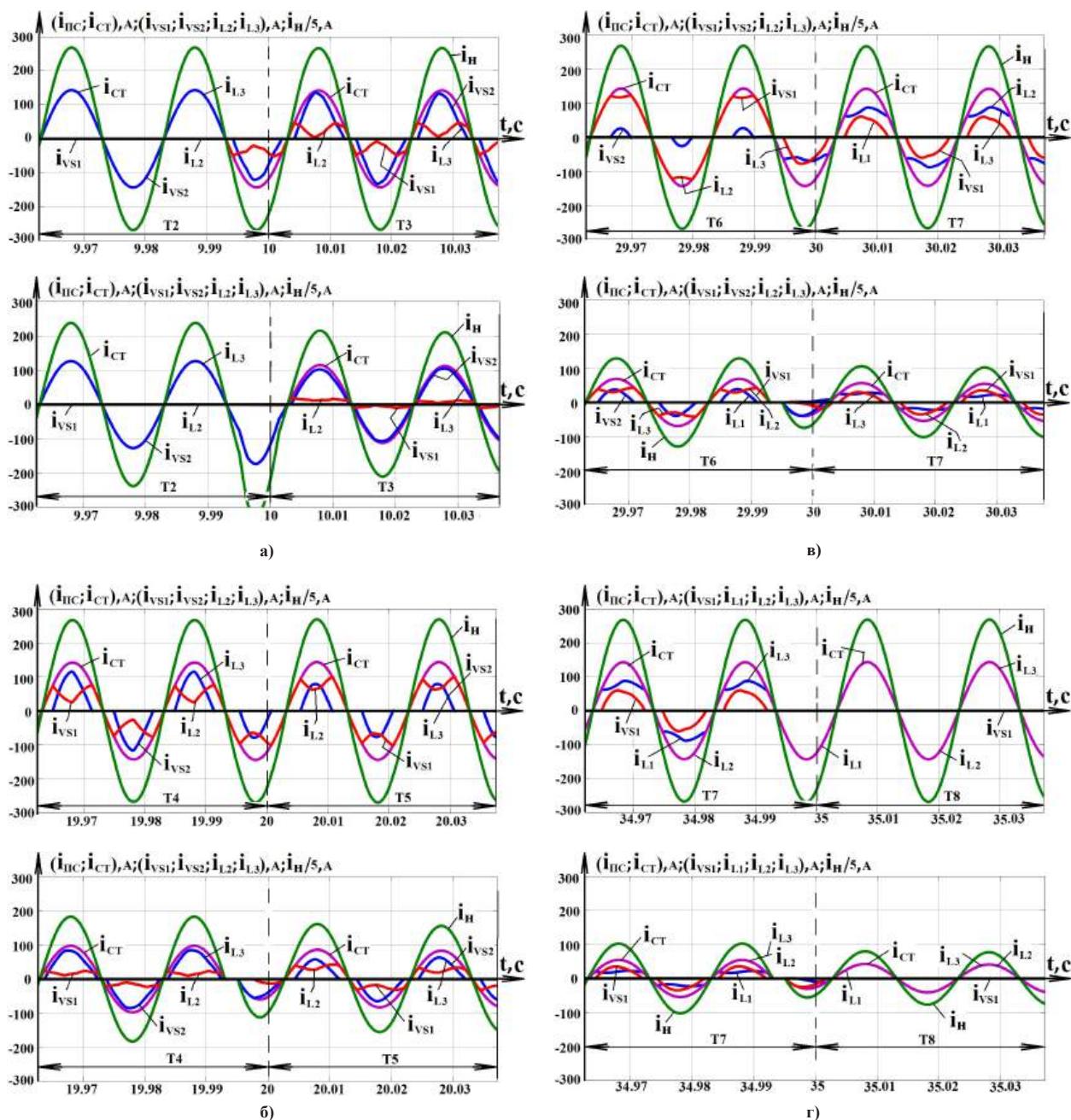


Рис. 5. Фрагменты мгновенных значений фазных токов на элементах системы электроснабжения и предлагаемого устройства при разных углах управления тиристорных ключей:
а–г — при повышении напряжения питающей сети (сверху) и снижении нагрузки (снизу)
Fig. 5. Fragments of instantaneous values of phase currents on the elements of the power supply system and the proposed device at different control angles of thyristor switches:
а–г — when the supply voltage increases (above) and the load decreases (below)

коэффициента несинусоидальности напряжения при повышении напряжения в питающей сети и номинальной нагрузке, а снизу — при снижении тока на нагрузке и номинальном напряжении в питающей сети. На рис. 3 более детально иллюстрируется изменение синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки при внезапном возникновении неустойчивости напряжения в питающей сети (рис. 3а, в) и снижении тока на нагрузке [22] (рис. 3а, в). Важно подчеркнуть, что на этих осциллограммах приведены мгновенные значения фазных токов и напряжений фазы «А». На осциллограммах рис. 3 время также указано в секундах.

Фрагменты на рис. 3 доказывают, что новый регулятор напряжения, сохраняя номинальное напряжение в СЭС на заданном уровне, не только не искажает синусоидальность напряжения питающей сети при его регулировании в широких пределах и диапазонах, но и предотвращает возникновение перенапряжения на элементах питающей сети при снижении тока нагрузки (рис. 2б и 3, кривая $u_{\text{ПС}}$). Это является одним из преимуществ заявляемого технического решения.

Осциллограммы на рис. 4 демонстрируют коэффициент искажения синусоидальности тока на разных элементах СЭС при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 % (рис. 4а) и снижения тока на нагрузке до -70 % (рис. 4б) от номинального значения. На этих осциллограммах (рис. 4) для демонстрации стабилизации напряжения (действующим значением напряжения нагрузки) при изменении напряжения в питающей сети и тока на нагрузке, а также для иллюстрации влияния реакторно-тиристорного устройства на синусоидальности токов СЭС представлены коэффициенты искажения синусоидальности тока питающей сети $K_{\text{ПС}}$, силового трансформатора $K_{\text{СТ}}$ и нагрузки $K_{\text{Н}}$. Результаты исследования коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках СЭС показали, что предлагаемый регулятор напряжения не искажает синусоидальности токов и сохраняет их синусоидальную форму, несмотря на широкие изменения углов управления тиристорных ключей для стабилизации напряжения при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 % (рис. 4а) и снижении тока на нагрузке до -70 % (рис. 4б) от номинального уровня. Это также является ещё одним из преимуществ заявляемого регулятора напряжения, которое позволяет повысить эффективность работы СЭС в стационарных и динамических режимах работы.

На рис. 5 для демонстрации искажения токов в СЭС и предлагаемом устройстве при регулировании напряжения в вышеуказанных пределах приводятся фрагменты мгновенных значений токов питающей сети ($i_{\text{ПС}}$), силового трансформатора ($i_{\text{СТ}}$) и нагрузки ($i_{\text{Н}}$), а также мгновенных значений токов первых ($i_{\text{ТК1}}$) и вторых ($i_{\text{ТК2}}$) тиристорных ключах, первого ($i_{\text{Л1}}$), второго ($i_{\text{Л2}}$) и третьего ($i_{\text{Л3}}$) реакторов. На этих фрагментах (рис. 5) сверху приведены мгновенные значения фазных токов фазы «А» при повышении напряжения в питающей сети и номинальной нагрузке, а снизу — при снижении тока на нагрузке и номинальном напряжении в питающей сети.

Фрагменты на рис. 5 подтверждают, что на всех интервалах времени (Т2 до Т8), несмотря на изменение углов управления тиристорных ключей в широких пределах, токи СЭС остаются синусоидальными, а токи предлагаемого устройства только

на интервалах времени Т2 и Т8 имеют синусоидальности, и в процессе стабилизации напряжения по мере изменения углов управления тиристорных ключей ток на элементах предлагаемого регулятора напряжения начинает искажаться в той или иной степени, а результирующий ток, который является током силового трансформатора (питающей сети), не искажается и сохраняет синусоидальную форму.

Заключение

Анализируя полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения и искажения тока в СЭС предлагаемым гибридным регулятором напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах, можно отметить следующее:

1. Разработана имитационная модель СЭС с предлагаемым регулятором напряжения и измерительными модулями для вычисления коэффициентов несинусоидальности напряжения и искажения тока на разных участках СЭС с целью оценки расширения функциональных возможностей нового регулятора напряжения.

2. Установлено, что заявляемое техническое решение полностью обеспечивает синусоидальность напряжения питающей сети при стабилизации напряжения в СЭС в случае повышения напряжения в питающей сети и снижения тока на нагрузке от номинального уровня. Устройство, поддерживая номинальное напряжение в СЭС на заданном уровне, создает максимальное значение коэффициента несинусоидальности напряжения в силовом трансформаторе и на нагрузке на $K_{\text{У}} = 3,6$ % при повышении напряжения в питающей сети и на $K_{\text{У}} = 1,5$ % при снижении тока на нагрузке, что не выходит за нормально допустимые нормы, установленные отечественными и зарубежными ГОСТами.

Результаты исследования подтверждают, что предложенное техническое решение при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах не искажает синусоидальности токов СЭС, что приводит к повышению эффективности работы не только потребителей электроэнергии, но и силового трансформатора и питающей сети.

Список источников / References

1. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Суслов К. В. [и др.]. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 6. С. 3—13. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN: HQLXTA.

Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. [et al.]. Soglasovannoye upravleniye nakopitelyami elektroenergii i ustanovkoy raspredelennoy generatsii s prognosticheskimi regulyatorami v sisteme elektrosnabzheniya s ponizhennym kachestvom elektroenergii [Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2023. Vol. 25, no. 6. P. 3—13. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN: HQLXTA. (In Russ.).

2. Климаш В. С., Константинов А. М. Устройство для повышения качества напряжения и энергетических показателей трансформаторных подстанций // Известия Тульского госу-

дарственного университета. Технические науки. 2019. № 9. С. 570–581. EDN: LTKRSG.

Klimash V. S., Konstantinov A. M. Ustroystvo dlya povysheniya kachestva napryazheniya i energeticheskikh pokazateley transformatornykh podstantsiy [Device for increasing voltage quality and energy indicators of transformer substations]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2019. No. 9. P. 570–581. EDN: LTKRSG. (In Russ.).

3. Наумов А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 85–92. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92. EDN: MTRTJG.

Naumov A. A. Obespecheniye trebuyemogo kachestva elektricheskoy energii [The required quality of electrical energy provision]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020. Vol. 22, no. 1. P. 85–92. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92. EDN: MTRTJG. (In Russ.).

4. Фетисов Л. В., Роженцова Н. В., Булатов О. А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 11–12. С. 99–106. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. EDN: YXRTWH.

Fetisov L. V., Rozhentsova N. V., Bulatov O. A. Povysheniye kachestva elektricheskoy energii v setyakh nizkogo napryazheniya [Improving the quality of electric power in low voltage networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2018. Vol. 20, no. 11–12. P. 99–106. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. EDN: YXRTWH. (In Russ.).

5. Al-Saedi W., Lachowicz S. W., Habibi D. [et al.]. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2011. Vol. 42, no. 1-6. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2011.6257101.

6. Montoya F. G., Banos R., Gil C. [et al.]. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2010. Vol. 23. P. 695–703. DOI: 10.1016/j.engappai.2010.01.011.

7. Lumberras D., Galvez E., Collado A. [et al.]. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 5792. DOI: 10.3390/en13215792.

8. Солодухо Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для её компенсации. Москва: Информэлектро, 1981. 89 с.

Solodukho Ya. Yu. Sostoyaniye i perspektivy vnedreniya v elektroprivod staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti (obobshcheniye otechestvennogo i zarubezhnogo opyta). *Reaktivnaya moshchnost' v setyakh s nesinusoidal'nymi tokami i staticheskiye ustroystva dlya eyë kompensatsii* [The state and prospects of introducing static reactive power compensators into an electric drive (generalization of domestic and foreign experience). Reactive power in networks with non-sinusoidal currents and static devices for its compensation]. Moscow, 1981. 89 p. (In Russ.).

9. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I. [et al.]. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. 2019. Vol. 20. DOI: 10.1515/ijeeps-2018-0269.

10. Ma J. Classification of power quality disturbances via deep learning. *Journal of IETE, Technical Review*. 2017. Vol. 34, no. 4. P. 408–415. DOI: 10.1080/02564602.2016.1196620.

11. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems.

E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801009.

12. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. [et al.]. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1951. DOI: 10.3390/en14071951.13.

13. Moursi M., Joos G., Abbey C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation. *Power Electronics*. 2008. P. 1178–1190. DOI: 10.1109/TPEL.2008.921195.

14. Haque M. H. Compensation of distribution system voltage Sag by DVR and D-STATCOM. *Proceedings of IEEE Porto Power Tech*. 2001. Vol. 5. 5 p. DOI: 10.1109/PTC.2001.964609.

15. Belyaev A. N., Smolovik S. V. An improvement of AC electrical energy transmission system with series compensation by implementation of controllable shunt reactors. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society PowerTech*. 2003. Vol. 3. 6 p. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304526.

16. Табаров Б. Д. Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения // *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28, № 3. С. 475–488. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-475-488. EDN: MMQUKA.

Tabarov B. D. Issledovaniye vliyaniya novogo upravlyayemogo regulatora napryazheniya na nesinusoidal'nost' toka i napryazheniya sistemy elektrosnabzheniya [Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system]. *iPolytech Journal*. 2024. Vol. 28, no. 3. P. 475–488. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-475-488. EDN: MMQUKA. (In Russ.).

17. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01–07–2014. Москва: Росстандарт, 2014. 16 с.

GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. 2014. 16 p. (In Russ.).

18. ГОСТ IEC 61000-6-3–2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 6-3. Общие стандарты. Стандарт электромагнитной эмиссии для жилых, коммерческих и легковых промышленных обстановок. Введ. 01–09–2017. Москва: Стандартинформ, 2020. 15 с.

GOST IEC 61000-6-3–2016. Elektromagnitnaya sovmestimost' (EMS). Chast' 6-3. Obshchiye standarty. Standart elektromagnitnoy emissii dlya zhilykh, kommercheskikh i legkikh promyshlennykh obstanovok [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 6-3. Generic standards. Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments]. Moscow, 2020. 15 p. (In Russ.).

19. Пат. 2829330 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/25. Реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции / Табаров Б. Д. № 2024114284; заявл. 24.05.2024; опубл. 30.10.2024. EDN: LAXNHD.

Patent No. 2829330 C1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/25. Reaktorno-tiristornoye puskoreguliruyushcheye ustroystvo na vysokoy storone transformatornoy podstantsii [Reactor-thyristor start-control device on high side of transformer substation] / Tabarov B. D. No. 2024114284. EDN: LAXNHD. (In Russ.).

20. Пат. 2834452 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 М 5/257, Н 02 Р 13/06. Способ управления реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством силового трансформатора / Табаров Б. Д. № 2024120821; заявл. 19.07.2024; опубл. 11.02.2025. EDN: IINBAU.

Patent No. 2834452 C1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/257, H 02 P 13/06. Sposob upravleniya reaktorno-tiristornym puskoreguliruyushchim ustroystvom silovogo transformatora [Method of controlling reactor-thyristor control device of power

transformer] / Tabarov B. D. No. 2024120821. EDN: IINBAU. (In Russ.).

21. Климаш С. В., Климаш В. С., Власьевский С. В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 11–16. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16. EDN: ZHLGNH.

Klimash S. V., Klimash V. S., Vlas'yevskiy S. V. Spetsializirovannyye moduli dlya issledovaniya energeticheskikh pokazateley elektrotekhnicheskikh ustroystv v srede Matlab [Specialized modules for calculation of energy coefficients of electrical engineering devices in Matlab]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2017. No. 3(36). P. 11–16. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16. EDN: ZHLGNH. (In Russ.).

22. Табаров Б. Д. Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства // iPolytech Journal. 2025. Т. 29, № 2. С. 252–269. DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-252-269. EDN: BQPAMI.

Tabarov B. D. Printsipy postroyeniya transformatornoy podstantsii na osnove upravlyayemogo reaktorno-tiristornogo ustroystva [Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor]. *iPolytech Journal*. 2025. Vol. 29, no. 2. P. 252–269. DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-252-269. EDN: BQPAMI. (In Russ.).

ТАБАРОВ Бехруз Довудходжаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, г. Комсомольск-на-Амуре.

SPIN-код: 1493-7563

AuthorID (PIHL): 1059595

ORCID: 0000-0001-5878-3755

AuthorID (SCOPUS): 57206482446

ResearcherID: AAC-7453-2020

Адрес для переписки: behruz.tabarov@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 01.08.2025; принята к публикации 14.10.2025.

TABAROV Bekhruz Dovudkhodzhaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur.

SPIN-code: 1493-7563

AuthorID (RSCI): 1059595

ORCID: 0000-0001-5878-3755

AuthorID (SCOPUS): 57206482446

ResearcherID: AAC-7453-2020

Correspondence address: behruz.tabarov@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 05.05.2025; approved after reviewing 01.08.2025; accepted for publication 14.10.2025.

УДК/UDC 519.23:681.518.5
DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-82-91
EDN: GTXLIW
Научная статья/Original article

МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. А. Дышлевский^{1,2}, И. С. Кудрявцева¹, А. П. Науменко¹, В. А. Рольгейзер^{1,3}

¹Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²ООО «ВС Инжиниринг», Россия, 644010, г. Омск, б-р Мартынова, 4

³Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. К. Маркса, 35

В работе рассматриваются методы технической диагностики, основанные на формировании правил принятия решений, которые связывают совокупность диагностических признаков с возможными состояниями объекта. Использование вероятностно-статистических методов позволяет принимать решения на основе вероятностей возникновения различных признаков. Исследование показывает, что выбор метода теории принятия решений зависит от конкретной проблемы. Метод Байеса выделяется своей эффективностью и простотой расчёта, что делает его популярным в различных отраслях для оценки технического состояния объектов. В то же время для систем с повышенной ответственностью, таких как системы безопасности, предпочтение отдаётся методу Вальда, который минимизирует риск и обеспечивает максимальную безопасность.

Ключевые слова: оценка технического состояния, методы теории принятия решений, вероятностно-статистические методы, система мониторинга и диагностики, метод Байеса, метод Вальда.

Для цитирования: Дышлевский В. А., Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Рольгейзер В. А. Методы теории принятия решений как способ повышения достоверности оценки состояния технических систем // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 82–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-82-91. EDN: GTXLIW.



© Дышлевский В. А., Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Рольгейзер В. А., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODS OF DECISION THEORY AS A WAY TO INCREASE THE RELIABILITY OF ASSESSMENT OF THE TECHNICAL SYSTEMS STATE

V. A. Dyshlevskiy^{1,2}, I. S. Kudryavtseva¹, A. P. Naumenko¹, V. A. Rol'geyzer^{1,3}

¹Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²LLC "VS Engineering", Russia, Omsk, Martynov Boul., 4, 644010

³Omsk State Transport University, Russia, Omsk, Karl Marks Ave., 35, 644046

The article discusses various approaches to technical diagnostics based on decision-making methods. Particular attention is paid to probabilistic and statistical methods that help to make informed decisions, taking into account the likelihood of certain functions being performed. The study shows that the choice of a specific technique depends on the specific problem being considered. Bayesian methods are efficient and easy to calculate, which makes them popular for industrial applications in assessing technical condition. For high-risk systems the article recommends to apply the Wald method.

Keywords: assessment of technical condition, methods of decision theory, probabilistic and statistical methods, monitoring and diagnostic system, Bayes method, Wald method.



Введение

В современных условиях рыночной экономики для предприятий с непрерывным производством продукции актуальными являются проблемы, связанные с повышением ресурса работы технологического оборудования и обеспечением его безаварийной эксплуатации. Решение указанных проблем может быть достигнуто путём внедрения средств диагностирования технических устройств, позволяющих на ранней стадии зафиксировать начало деструктивных процессов и отслеживать процесс их развития вплоть до перехода в предельное или опасное состояние [1, 2].

Интенсивность отказов оборудования можно разделить на три стадии (рис. 1) [3, 4]:

1. Период начальной приработки. На данной стадии система часто даёт сбой из-за производственных дефектов и отказа наиболее уязвимых компонентов со скрытыми недостатками. Количество отказов уменьшается по мере замены неисправных деталей на более качественные.

2. Период нормальной работы. Система работает стабильно, и число отказов остаётся примерно одинаковым.

3. Период массового износа и старения. В указанный период система начинает часто ломаться. Дальнейшая эксплуатация становится нецелесообразной.

Очевидно, одним из наиболее важных механизмов обеспечения надёжности объектов является своевременное предупреждение или обнаружение неисправностей, а также оценка их технического состояния. Мониторинг технического состояния на промышленных предприятиях может принести значительную экономию: увеличение эффективности производства на 2–10 % и снижение затрат на обслуживание оборудования на 50 % [5].

На практике основной сложностью, возникающей при мониторинге технического состояния, является уменьшение риска пропуска опасного состояния оборудования τ , представляющего собой

сумму ошибки системы диагностики и мониторинга (СДМ) η и человеческого фактора h [6, 7].

Аварии и инциденты продолжают происходить даже при наличии современных технологий и систем, нанося значительный ущерб людям, окружающей среде и экономике. Так, например, в 2017 г. на хранилище нефтепродуктов ТЭЦ в Норильске произошла авария, которая привела к значительным убыткам. Согласно отчётам, отсутствие системы мониторинга состояния резервуаров привело к тому, что не была вовремя обнаружена утечка нефтепродуктов [8]. Стоимость последствий аварии оценивается в 146 млрд руб. [9]. При этом стоимость системы мониторинга состояния резервуаров, которая могла бы предотвратить аварию, оценивается в десятки миллионов рублей.

В 2009 году на Саяно-Шушенской ГРЭС произошла авария, которая привела к гибели 75 человек [10]. Причиной аварии стало игнорирование показаний датчиков относительной вибрации [10]. Очевидно, что, если бы операторы ГРЭС приняли во внимание эти показания, аварию можно было предотвратить.

Ещё одна авария произошла летом 2014 г. на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе. По данным расследования причиной аварии стало критическое утончение металла технологического трубопровода в результате локальной коррозии, а также неправильная работа экспертов в области промышленной безопасности [11].

Рассмотрение этих случаев показывает значительное влияние человеческого фактора. Следовательно, в системах, где основным звеном управления остаётся человек, уменьшение риска пропуска опасного состояния сводится к минимизации ошибки СДМ.

В современных условиях, когда технологии и системы становятся все более сложными, оценка технического состояния объектов требует применения специальных методов и подходов. К таким методам относят теорию распознавания образов и вероятностно-статистические методы принятия решений, которые позволяют проанализировать риски и последствия различных исходов и принять обоснованное решение. Это решение основывается на риске, который учитывает вероятность наступления события и его последствия.

Постановка задачи

Целью исследования является обзор существующих методов теории принятия решений для оценки технического состояния оборудования и выработка рекомендаций по их применению в зависимости от типа решаемой диагностической задачи и требований к надёжности. Задачи исследования:

1. Рассмотреть применение методов теории принятия решений для осуществления задач в различных отраслях промышленности.

2. Проанализировать современные проблемы и задачи в области оценки технического состояния объектов.

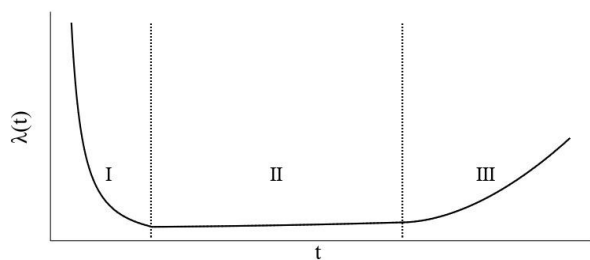


Рис. 1. Интенсивность отказов оборудования:
I — период приработки; II — период нормальной эксплуатации;
III — период массового износа и старения;
 $\lambda(t)$ — интенсивность отказов; t — время
Fig. 1. Equipment failure rate: I — run-in period;
II — period of normal operation; III — period of mass wear
and aging; $\lambda(t)$ — failure rate; t — time

Теоретические основы оценки технического состояния объекта

Техническое состояние объекта — это состояние, характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях [12]. Ниже приведены виды технического состояния объекта:

- исправное (исправность) / неисправное (неисправность);
- работоспособное/неработоспособное;
- рабочее/нерабочее;
- предельное;
- опасное;
- предотказное.

Методы оценки технического состояния разделяют на субъективные и объективные.

Субъективные методы подразумевают методы оценки технического состояния, при которых для сбора информации используются органы чувств человека, а также простейшие устройства и приспособления. К таким методам относятся:

- визуальный осмотр;
- контроль температуры;
- анализ акустических сигналов и др.

Под объективными методами подразумеваются такие методы оценки технического состояния, при которых для сбора и анализа информации используются специализированные устройства и приборы, электронно-вычислительная техника, а также соответствующее программное и нормативное обеспечение. Они включают:

- вибрационную диагностику;
- методы неразрушающего контроля и др.

Применение методов теории принятия решений в различных отраслях

Теория принятия решений — это наука, которая направлена на разработку методов для анализа и принятия оптимальных решений в условиях неопределённости, риска и многокритериальности, с целью достижения желаемого результата и максимизации полезности [13].

Методы теории принятия решений можно разделить на две группы: формализованные (математические) и неформализованные (эвристические) [14].

Формализованные методы подходят для структурированных проблем, которые возможно разрешить на основе статистических данных и других количественных показателей. Основной способ работы — моделирование реальности и её анализ.

Неформализованные методы применяются в случае, когда математический аппарат неприменим. Они включают в себя совокупность логических приёмов и методик выбора решений с помощью сопоставления альтернатив и с учётом накопленного опыта. Указанные методы используют, если отсутствует необходимая информация или она не устраняет неопределённость [14].

К формализованным методам относятся:

- экономико-математические модели и методы;
- системный анализ;
- экспертные оценки и суждения.

Неформализованные методы:

- метод мозгового штурма;
- метод Дельфы;
- метод сценариев;
- метод дерева решений.

Все методы нашли широкое применение в различных отраслях. Так, например, анализ научных

разработок в области принятия решений в государственном секторе за 2010–2020 гг. выявил тенденцию к использованию унифицированных методов в процессах принятия решений [15].

Алгоритм дерева решений — метод, позволяющий дать представление о действиях и их последствиях в виде упорядоченной иерархии. Указанный метод помогает, например, врачам принимать более точные и обоснованные диагностические решения за счёт систематизации и структурирования данных, которые лучшим образом соответствуют симптомам и лабораторным результатам конкретного пациента [16, 17].

Помимо алгоритма дерева решений в медицине наиболее эффективен метод Receiver operating characteristic (ROC). Известно использование ROC для анализа по определению способности сывороточного ферритина, чтобы спрогнозировать тяжесть заболевания и смертность у пациентов с COVID-19 [18]. Также ROC — анализ, который применяется для оценки производительности моделей машинного обучения для классификации доброкачественных и злокачественных опухолей [19].

При разработке алгоритма прогнозирования результатов исследований биоэквивалентности был применён метод последовательного статистического анализа, который обеспечил высокую чувствительность и специфичность (90 % и 80 % соответственно). Также сообщается, что разработанный алгоритм может быть модифицирован и улучшен с учётом накопления дополнительных данных, что позволит повысить его точность и применимость на практике [20].

Для решения проблем навигации и принятия решений в условиях неопределённости применяются метод Байеса и метод нечёткой логики. Метод Байеса используется для улучшения навигации в условиях неопределённости, а метод нечёткой логики — для оценки риска столкновения и принятия решений о предотвращении столкновений в критических ситуациях [21, 22].

С целью повышения уровня защищённости и предотвращения несанкционированного доступа злоумышленника к информации предлагается методологический подход к выявлению наиболее опасных факторов, которые могут привести к взлому [23].

Данный метод основан на использовании метода Байеса и экспериментальных данных в виде времени и объёмов памяти, выделяемых системой для запуска атак. Применение метода рассматривается на примере сетевой атаки «Внедрение ложного объекта сети».

Для фильтрации спама и улучшения обработки текстовой информации применяется наивный байесовский метод, который позволяет классифицировать сообщения как спам или не-спам на основе вероятностного анализа [24].

Теория игр нашла широкое применение в глубоком обучении, которое является быстро развивающейся областью исследований в сфере искусственного интеллекта. Отмечается, что теория игр может быть использована для улучшения результатов в моделях глубокого обучения [25].

Методы теории принятия решений в оценке технического состояния объекта

Техническая диагностика основана на формировании правил принятия решений, каждое из которых присваивает совокупность диагностических

признаков одному из возможных состояний (диагнозов) объекта [26, 27].

Вероятностно-статистические методы используются для принятия решений на основе совокупности диагностических признаков, каждый из которых имеет определённую вероятность возникновения [28].

Основные вероятностно-статистические методы [29 – 36]:

- метод минимального риска;
- метод Неймана – Пирсона;
- метод Байеса;
- наивный байесовский классификатор;
- метод Вальда;
- метод Сэвиджа;
- метод минимакса;
- метод Лапласа;
- ROC-анализ.

Метод минимального риска — метод, который используется для определения граничного значения определяющего параметра для принятия решения о состоянии объекта исходя из условия минимума средних затрат.

Выражение среднего риска имеет следующий вид:

$$R = C_{11}P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_1)dx + C_{21}P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_1)dx + \\ + C_{12}P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(x/D_2)dx + C_{22}P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(x/D_2)dx,$$

где диагноз D_1 — исправное состояние; D_2 — неисправное состояние; C_{21} — цена ложной тревоги; C_{12} — цена пропуска цели; C_{11} , C_{22} — цены правильных решений, которые для сравнения со стоимостью ошибок принимаются отрицательными.

Решения о состоянии объекта по методу минимального риска принимаются следующим образом:

$$x \in D_1, \text{ если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} > \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1}, \\ x \in D_2, \text{ если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} > \frac{(C_{12} - C_{22})P_2}{(C_{21} - C_{11})P_1}.$$

Метод Неймана – Пирсона минимизирует вероятность ложной тревоги при сохранении определённого уровня вероятности обнаружения.

Метод Байеса — способ определения вероятности события (гипотезы) на основе косвенных подтверждений (данных), которые могут быть неточными. Он использует обобщённую формулу Байеса.

$$P(D_i/K^*) = \frac{P(D_i) \cdot P(K^*/D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s) \cdot P(K^*/D_s)},$$

где $P(D_i/K^*)$ — условная вероятность диагноза D_i при наличии комплекса признаков K^* ; $P(K^*/D_i)$ — условная вероятность появления комплекса признаков K^* у объектов с состоянием D_i ; $P(D_i)$ — вероятность диагноза D_i , определяемая по статистическим данным (априорная вероятность); $P(D_s)$ — набор всех возможных диагнозов, вероятность которых в совокупности равна единице.

Наивный байесовский классификатор представляет собой критерий, основанный на теореме Бай-

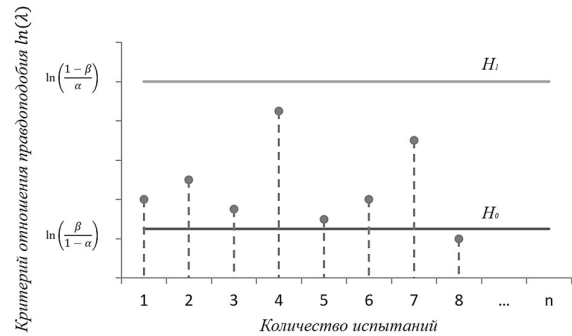


Рис. 2. Метод последовательного анализа Вальда:
 H_0, H_1 — нулевая и конкурирующая гипотезы;
 α, β — ошибки первого и второго рода соответственно
Fig. 2. Wald's sequential analysis method: H_0, H_1 — null and competing hypotheses; α, β — errors of the first and second types, respectively

еса при условии соблюдения строгой (наивной) независимости признаков.

Метод Вальда — способ принятия решений, при котором количество испытаний или обследований не устанавливается заранее.

Вместо этого испытания проводятся до тех пор, пока не будет достигнута определённая степень риска (рис. 2).

Критерий отношения правдоподобия записывается в следующем виде:

$$\lambda = \frac{P_1}{P_0} = \prod_{i=1}^n \frac{f(x_i, \theta_1)}{f(x_i, \theta_0)} \geq U_\alpha,$$

где $f(x_i, \theta_n)$ — плотность распределения случайной величины X при любом значении параметра θ ; если θ_n — параметр распределения, например, наработка на отказ, то θ_1 и θ_0 — соответственно допустимое и заданное значения наработки на отказ; U_α — квантиль функции нормального распределения.

Испытания завершаются и нулевая гипотеза H_0 будет принята, если

$$\sum_{j=1}^n \ln \left[\frac{f(x_j, \theta_1)}{f(x_j, \theta_0)} \right] \leq \ln \left(\frac{\beta}{1-\alpha} \right).$$

Испытания завершаются и конкурирующая гипотеза H_1 будет принята, если

$$\sum_{j=1}^n \ln \left[\frac{f(x_j, \theta_1)}{f(x_j, \theta_0)} \right] \geq \ln \left(\frac{1-\beta}{\alpha} \right).$$

Испытания будут продолжены в случае, если

$$\ln \left(\frac{\beta}{1-\alpha} \right) < \sum_{j=1}^n \ln \left[\frac{f(x_j, \theta_1)}{f(x_j, \theta_0)} \right] < \ln \left(\frac{1-\beta}{\alpha} \right).$$

Метод Сэвиджа, как и метод Вальда, является методом крайнего пессимизма. Он рекомендует выбирать оптимальную стратегию, при которой минимизируется величина максимального риска. Решение в данном методе принимается по тем же условиям, что и в методе Вальда.

Метод минимакса — частный случай критерия Байеса. Его используют для нахождения такой величины порога, при которой минимизируется максимум возможного риска. Это значит, что

априорные вероятности P_1 и P_2 подбираются таким образом, чтобы минимальное значение функции риска в «наихудшем случае» имело максимальную величину.

Если предположить, что величина риска зависит от x и P_1 (вероятность второго диагноза $P_2 = 1 - P_1$), то можно выразить следующую зависимость:

$$R(x, P_1) = C_{11}P_1 \int_{-\infty}^x f(x/D_1)dx + \\ + C_{21}P_1 \int_x^{\infty} f(x/D_1)dx + C_{12}(1 - P_1) \int_{-\infty}^x f(x/D_2)dx + \\ + C_{22}(1 - P_1) \int_x^{\infty} f(x/D_2)dx.$$

Приравняв к нулю частные производные по x и P_1 , получим

$$\frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} = \frac{(C_{12} - C_{22})(1 - P)}{(C_{21} - C_{11})P}, \\ C_{21} \int_x^{\infty} f(x/D_1)dx + C_{11} \int_{-\infty}^x f(x/D_1)dx = \\ = C_{12} \int_x^{\infty} f(x/D_2)dx + C_{22} \int_{-\infty}^x f(x/D_2)dx.$$

Если x_0^* и P_1^* являются корнями указанных уравнений, то точка $R(x_0^*, P_1^*)$ является экстремальной. Таким образом, необходимо выбрать такую величину x_0 , чтобы при наименее благоприятных значениях P_1 потери, связанные с ошибочными решениями, были минимальными.

Метод Лапласа — метод, который используется для выбора оптимальной стратегии в условиях неопределённости. В данном случае предполагается, что все состояния равновероятны и оптимальной считается стратегия, обеспечивающая максимальный средний выигрыш.

ROC-анализ — метод, используемый для наглядного сравнения и оценки качества моделей бинарных классификаторов при различных пороговых значениях. ROC-анализ помогает выбрать оптимальную модель и отбросить неоптимальные независимо от затрат и распределения классов. Он тесно связан с анализом затрат и выгод при принятии диагностических решений.

ROC-кривая — график, отображающий соотношение между чувствительностью Se алгоритма классификации и частотой ложноположительных решений (значением $1 - Sp$ алгоритма) при пошаговом изменении порога решающего правила.

$$Se = TPR = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP + FN} = 1 - \alpha,$$

$$1 - Sp = FPR = \frac{FP}{N} = \frac{FP}{FP + TN} = \beta,$$

где TP (true positive) — количество событий, правильно отнесённых к основной гипотезе; P — общее количество событий, имеющих место быть по основной (Positive) гипотезе; FN (false negative) — количество событий основной гипотезы, которые неправильно отнесены к конкурирующей гипотезе (ошибка первого рода без учёта априорной вероятности); FP — ложноположительные результаты; TN — истинно отрицательные результаты.

Таким образом, по вертикальной оси графика ROC-кривой представлена чувствительность $Se = 1 - \alpha$, а по горизонтальной — величина, равная $1 - Sp = \beta$.

Вероятностно-статистические методы могут обрабатывать признаки разной физической природы или механизмов формирования. Однако они требуют тщательной оценки вероятности каждого признака и неопределённости диагноза. Указанные методы могут значительно улучшить уровень решаемости задач и обеспечить высокую достоверность получаемых результатов [29].

Сегодня известно, что измерение и анализ вибрации (виброскорости, виброперемещения) широко используются в промышленности для мониторинга состояния различных машин, и они могут обнаруживать до 90 % неисправностей или отказов в машинах по изменению вибрационных сигналов [37].

Метод статистической диагностики агрегатов нефтеперерабатывающего комплекса предполагает совместное использование параметров виброускорения, виброскорости и виброперемещения. Этот метод обеспечивает точность постановки диагноза не менее 95–98 % [38]. Параметр виброускорения позволяет диагностировать дефекты оборудования в высокочастотном диапазоне спектра. Параметр виброскорости характеризует неисправности в диапазоне средних частот, а параметр виброперемещения отражает проблемы агрегата в низкочастотном диапазоне спектра [38, 39].

Использование статистических методов принятия решений позволяет оценить риск неисправностей и отказов, а также определить наиболее вероятное состояние оборудования, что является важным шагом в постановке диагноза и принятии обоснованных решений о ремонте или замене оборудования. Такой подход может включать в себя применение различных алгоритмов распознавания, таких как метод максимального правдоподобия, метод байесовской оценки, метод минимизации ошибки и др.

Так, точность оценки технического состояния электрооборудования может быть увеличена с помощью гибридной модели, сочетающей методы нечёткой логики и искусственных нейронных сетей. Интенсивность проявления каждого критерия и степень важности каждого состояния могут быть учтены с помощью метода Саати [40].

Для технической диагностики топливной аппаратуры с использованием виброакустических характеристик во время работы дизельного двигателя может быть использован метод Байеса. Применяя этот метод к диагностической матрице, можно определить влияние засорения сопел форсунки и износа топливного насоса на эффективность работы дизельного двигателя. При наличии выверенной статистики дефектов и их признаков метод Байеса обеспечивает высокую достоверность во время диагностирования и прогнозирования технического состояния различного оборудования [41].

Также метод Байеса может быть использован для распознавания диагнозов неисправности тягового двигателя локомотива в различных режимах работы и для диагностики технического состояния породоразрушающего инструмента [42, 43].

Компьютерный инструмент «Модельер 2.0», разработанный на факультете «Эксплуатация летательных аппаратов» Иркутского филиала Московского государственного технического университета граж-

Таблица 1. Системная классификация критериев технического состояния объектов при АЭ контроле [46]
Table 1. Systematic classification of criteria for the technical condition of objects under AE control [46]

Наименование критерия	Преимущества	Недостатки
Риск потребителя	Низкая стоимость АЭ контроля	Пропуск бракованных изделий, снижение эксплуатационной надёжности
Риск поставщика	Минимизация неблагоприятной ситуации и возможных потерь	Перебраковка годных изделий, повышение их себестоимости
Критерий идеального наблюдателя	Суммарный риск потребителя и поставщика	Стоимость перебраковки и недобраковки считается равной, хотя последствия их различны
Критерий минимума среднего риска	Исключение больших потерь при пропуске некачественных изделий	Высокая стоимость АЭ контроля
Среднеквадратичная ошибка контролируемого параметра	Возможность статистической обработки результатов	Необходимость разделения нестационарного процесса АЭ на ряд квазистационарных
Функция желательности Харрингтона	Приведение частных откликов к безразмерному виду	Субъективизм, привлечение априорной информации
Критерий Неймана – Пирсона	Не требуется априорной информации о вероятностях состояний	Необходимость знания допустимых вероятностей правильной и ложной классификации дефектов
Критерий максимального правдоподобия	Несложность вычислительных операций	Минимизация размерностей признакового пространства снижает достоверность заключений
Критерий апостериорной вероятности	Исключается необходимость использования матрицы потерь	Необходимость знания априорных вероятностей

данской авиации, позволяет принимать решения о текущем техническом состоянии авиационного оборудования с учётом фактических условий и технической политики авиакомпаний. Математический аппарат предложенного инструмента основан на последовательном анализе Вальда, байесовском подходе и критериях статистических решений (минимизации числа ошибочных решений, минимизации риска, наибольшего правдоподобия, минимакса, Неймана – Пирсона) [44].

Для диагностики неисправностей в топливных системах дизельных двигателей с помощью диагностической матрицы и виброакустических характеристик может быть использован метод последовательного анализа Вальда [45].

Для принятия решений о пригодности контролируемых изделий с помощью метода акустической эмиссии (АЭ) может быть использована системная классификация областей применения и рационального использования с учётом достоинств и недостатков критериев качества технического состояния объектов по источникам АЭ (табл. 1) [46].

Заключение

Проведённый анализ показал значимость вероятностно-статистических методов теории принятия решений для повышения достоверности диагностики промышленного оборудования. Установлено, что выбор оптимального метода определяется конкретной задачей, требованиями к системе диагностики и мониторинга, допустимыми вероятностями пропуска опасного состояния и ложной тревоги с учётом стоимости принимаемых решений.

В результате исследования сформулированы практические рекомендации по выбору метода на основе критериев.

1. Приоритет требования к надёжности:

— метод Вальда (последовательный анализ) следует выбирать для систем безопасности и критически важных объектов, где основным требованием является максимальное предотвращение опасных отказов (минимизация вероятности пропуска опасного состояния);

— метод Байеса рекомендуется для большинства стандартных задач диагностики, где требуется

сбалансированный подход, учитывающий как риски пропуска дефекта, так и экономические затраты на ложные тревоги.

2. Наличие и качество априорных данных:

— метод Байеса является предпочтительным при наличии устойчивой статистики, позволяющей достоверно оценить априорные и условные вероятности;

— метод Вальда более адаптивен в условиях дефицита априорной информации, так как делает акцент на последовательном накоплении данных в реальном времени.

Список источников / References

1. Костюков В. Н., Науменко А. П. Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательно-го действия // Контроль. Диагностика. 2007. № 3. С. 50–58. EDN: HZEZYT.

Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya mashin vozvratno-postupatel'nogo deystviya [The monitoring system of a technical condition of machines of reciprocating action]. Kontrol'. Diagnostika. *Journal of Russian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics*. 2007. No. 3. P. 50–58. EDN: HZEZYT. (In Russ.).

2. Костюков В. Н., Науменко А. П. Система мониторинга технического состояния поршневых компрессоров нефтеперерабатывающих производств // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2006. № 10. С. 38–47. EDN: HYODZL.

Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Sistema monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnykh kompressorov neftepererabatyvayushchikh proizvodstv [Monitoring system upon the technical condition of piston compressors on oil refining manufactures]. *Neftepererabotka i Neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskiye Dostizheniya i Peredovoy Opyt*. 2006. No. 10. P. 38–47. EDN: HYODZL. (In Russ.).

3. Дышлевский В. А. Причины отказов микроконтроллеров и способы повышения их безотказности // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по материалам XCVII студ. междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2021. С. 78–86. EDN: UWLQNY.

Dyshlevskiy V. A. Prichiny otkazov mikrokontrollerov i sposoby povysheniya ikh bezotkaznosti [The causes of

microcontroller failures and ways to improve their reliability]. *Nauchnoye Soobshchestvo Studentov XXI Stoletiya. Tekhnicheskiye Nauki*. Novosibirsk, 2021. P. 78–86. EDN: UWLQNY. (In Russ.).

4. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. Москва: Машиностроение, 1990. 447 с. ISBN 521-700-84-07.

Bolotin V. V. Resurs mashin i konstruktсий [Resource of machines and structures]. Moscow, 1990. 447 p. ISBN 521-700-84-07. (In Russ.).

5. Бардышев О. А., Попов В. А., Коровин С. К., Филин А. Н. Мониторинг технического состояния технических устройств на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 1. С. 52–56. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56. EDN: MNYKJP.

Bardyshev O. A., Popov V. A., Korovin S. K., Filin A. N. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnicheskikh ustroystv na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh [Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti. Occupational Safety in Industry*. 2020. No. 1. P. 52–56. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56. EDN: MNYKJP. (In Russ.).

6. Костюков В. Н., Наumenко А. П. Влияние человеческого фактора на оценку вероятности пропуска отказа системой мониторинга // В мире неразрушающего контроля. 2016. Т. 19, № 1. С. 72–77. EDN: VOFJLL.

Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Vliyaniye chelovecheskogo faktora na otsenku veroyatnosti propuska otказа sistemoy monitoring [Human factor influence on the assessment of the monitoring system failure probability]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya. Industrial Safety*. 2016. Vol. 19, no. 1. P. 72–77. EDN: VOFJLL. (In Russ.).

7. Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Наumenко А. П. [и др.]. Риски мониторинга оборудования топливно-энергетического комплекса // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 30–44. EDN: TEMIYN.

Kostyukov V. N., Boychenko S. N., Naumenko A. P. [et al.]. Riski monitoringa oborudovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa [Risks of monitoring fuel and energy complex equipment]. *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike*. 2014. No. 3. P. 30–44. EDN: TEMIYN. (In Russ.).

8. Расследование аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» завершено // НКПРОМ. URL: <https://nkprom.ru/news/norilsk-rassledovanie-avarii-na-tets-3-ao-ntek-zaversheno/> (дата обращения: 01.09.2024).

Rassledovaniye avarii na TETs-3 AO «NTEK» zaversheno [The investigation of the accident at CHPP-3 of JSC NTEK has been completed]. *NKPROM*. URL: <https://nkprom.ru/news/norilsk-rassledovanie-avarii-na-tets-3-ao-ntek-zaversheno/> (accessed: 01.09.2024). (In Russ.).

9. Решение Арбитражного суда Красноярского края от 12 февраля 2021 г. по делу N A33-27273/2020. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/medialibrary/1a2/Reshenie-po-delu-A33-27273-2020.pdf> (дата обращения: 01.09.2024).

Resheniye Arbitrazhnogo suda Krasnoyarskogo kraya ot 12 fevralya 2021 g. po delu N A33-27273/2020 [Decision of the Arbitration Court of the Krasnoyarsk Territory dated February 12, 2021 in case No. A33-27273/2020]. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/medialibrary/1a2/Reshenie-po-delu-A33-27273-2020.pdf> (accessed: 01.09.2024). (In Russ.).

10. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества «РусГидро» — «Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного». Москва: Ростехнадзор, 2009. 123 с.

Akt tekhnicheskogo rassledovaniya prichin avarii, proishedshey 17 avgusta 2009 goda v filiale Otkrytogo Aktsionernogo Obshchestva «RusGidro» — «Sayano-Shushenskaya GES imeni P. S. Neporozhnogo» [Act of technical investigation of the causes of the accident that occurred on August 17, 2009 in the branch of the Open Joint Stock Company «RusHydro» — Sayano-Shushenskaya HPP named after P. S. Neporozhnyy]. Moscow, 2009. 123 p. (In Russ.).

11. Матевосян Г. А., Долгушина Л. В. Прогнозирование обстановки при аварийных ситуациях на Ачинском НПЗ // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. материалов X Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск, 2020. С. 151–154. EDN: RRCGHH.

Matevosyan G. A., Dolgushina L. V. Prognozirovaniye obstanovki pri avariynnykh situatsiyakh na Achinskoye NPZ [Forecasting of emergency situations at the Achinsk Oil Refinery]. *Monitoring, Modelirovaniye i Prognozirovaniye Opasnykh Prirodnnykh Yavleniy i Chrezvychaynykh Situatsiy. Zheleznogorsk*, 2020. P. 151–154. EDN: RRCGHH. (In Russ.).

12. ГОСТ Р 27.102–2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. Введ. 01–01–2022. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.

GOST R 27.102–2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'yekta. Terminy i opredeleniya [Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions]. Moscow, 2021. 40 p. (In Russ.).

13. Болдырев А. С. Основные понятия теории принятия решений // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2013. Т. 57, № 1. С. 87–91. EDN: QBEBEL.

Boldyrev A. S. Osnovnyye ponyatiya teorii prinyatiya resheniy [The basic concepts of decision theory]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii. Vestnik of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2013. Vol. 57, no. 1. P. 87–91. EDN: QBEBEL. (In Russ.).

14. Кузнецов Ю. В. Проблемы теории и практики менеджмента. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 1994. 206 с.

Kuznetsov, Yu. V. Problemy teorii i praktiki menedzhmenta [Problems of theory and practice of management]. Saint-Petersburg, 1994. 206 p. (In Russ.).

15. Fountzoula C., Aravossis K. Decision-making methods in the public sector during 2010–2020: A systematic review, advances in operations research. 2022. P. 1–13. DOI: 10.1155/2022/1750672.

16. Ильинских Е. Н., Филатова Е. Н., Самойлов К. В. [и др.]. Применение алгоритма дерева решений для ранней дифференциальной диагностики между различными клиническими формами острого иксодового клещевого боррелиоза и клещевого энцефалита // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2023. Т. 28, № 5. С. 275–288. DOI: 10.17816/EID601806. EDN: PBJRBT.

Il'inskikh E. N., Filatova E. N., Samoylov K. V. [et al.]. Primeneniye algoritma dereva resheniy dlya ranney differentsial'noy diagnostiki mezhdru razlichnymi klinicheskimi formami ostrogo iksodovogo kleshchevogo borrelioz i kleshchevogo entsefalita [Applying decision tree algorithms to early differential diagnosis between different clinical forms of acute lyme borreliosis and tick-borne encephalitis]. *Epidemiologiya i infektsionnyye bolezni. Epidemiology and Infectious Diseases*. 2023. Vol. 28, no. 5. P. 275–288. DOI: 10.17816/EID601806. EDN: PBJRBT. (In Russ.).

17. Вафин Р. Р., Динисламова Р. Р., Зулкарнеев Р. Х. Построение модели принятия врачебных решений для дифференциальной диагностики заболеваний в форме дерева решений // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: труды VII Всерос. науч. конф. Уфа, 2019. С. 255–260. EDN: AJERHR.

Vafin R. R., Dinislamova R. R., Zulkarneyev R. Kh. Postroyeniye modeli prinyatiya vrachebnykh resheniy dlya differentsial'noy diagnostiki zabolevaniy v forme dereva resheniy [Creating a model of medical decision-making for differential diagnosis of diseases in the form of a decision tree]. *Informatsionnyye Tekhnologii Intelktual'noy Podderzhki Prinyatiya Resheniy*. Ufa, 2019. P. 255–260. EDN: AJERHR. (In Russ.).

18. Ahmed S. Evaluation of serum ferritin for prediction of severity and mortality in COVID-19-A cross sectional study. *Annals of Medicine and Surgery*. 2021. Vol. 63. P. 102–163. DOI: 0.1016/j.amsu.2021.02.009.

19. Pfof A., Lu S. C., Sidey-Gibbons C. Machine learning in medicine: a practical introduction to techniques for data preprocessing, hyperparameter tuning, and model comparison. *BMC Medical Research Methodology*. 2022. Vol. 22, no. 1. P. 282. DOI: 10.1186/s12874-022-01758-8.
20. Ромодановский Д. П., Хохлов А. Л. Возможность прогнозирования результатов исследований биоэквивалентности на основе последовательного статистического анализа информативных факторов // Качественная клиническая практика. 2020. № 1. С. 80–98. DOI: 10.37489/2588-0519-2020-1-80-99. EDN: DTQTIU.
- Romodanovskiy D. P., Khokhlov A. L. Vozmozhnost' prognozirovaniya rezul'tatov issledovaniy bioekvivalentnosti na osnove posledovatel'nogo statisticheskogo analiza informativnykh faktorov [The ability to predict the results of bioequivalence studies based on a consistent statistical analysis of informative factors]. *Kachestvennaya klinicheskaya praktika. Good Clinical Practice*. 2020. No. 1. P. 80–98. DOI: 10.37489/2588-0519-2020-1-80-99. EDN: DTQTIU. (In Russ.).
21. McNamara T. P., Chen X. Bayesian decision theory and navigation. *Psychonomic Bulletin and Review*. 2022. Vol. 29, no. 3. P. 721–752. DOI: 10.3758/s13423-021-01988-9.
22. Perera L. P., Carvalho J. P., Guedes Soares C. Fuzzy logic based decision making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions. *Journal of Marine Science and Technology*. 2011. Vol. 16. P. 84–99. DOI: 10.1007/s00773-010-0106-x.
23. Дровникова И. Г., Золотых Е. С. Методический подход к оценке вероятности реализации сетевых атак на объектах информатизации органов внутренних дел // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. № 4. С. 33–44. EDN: VONOPW.
- Drovnikova I. G., Zolotykh E. S. Metodicheskiy podkhod k otsenke veroyatnosti realizatsii setevykh atak na ob'yektakh informatizatsii organov vnutrennikh del [Methodological approach to assessing the probability of network attacks on the objects of informatization of internal affairs bodies]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia*. 2023. No. 4. P. 33–44. EDN: VONOPW. (In Russ.).
24. Хохлова А. Е., Бакланова О. Е., Тезекпаева Ш. Т. Применение метода наивного Байеса при решении задачи фильтрации спама // Вестник ВКТУ. 2024. № 2. DOI: 10.51885/1561-4212_2024_2_210.
- Khokhlova A. E., Baklanova O. E., Tezekpayeva Sh. T. Primeneniye metoda naivnogo Bayesa pri reshenii zadachi fil'tratsii spama [Application of the naive bayes method in solving the spam filtering problem]. *Vestnik VKTU. Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University*. 2024. No. 2. DOI: 10.51885/1561-4212_2024_2_210. (In Russ.).
25. Hazra T., Anjaria K. Applications of game theory in deep learning: a survey. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. P. 8963–8994. DOI: 10.1007/s11042-022-12153-2.
26. Науменко А. П. Научно-методические основы вибродиагностического мониторинга поршневых машин в реальном времени: дисс. ... д-ра техн. наук. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 423 с.
- Naumenko A. P. Nauchno-metodicheskiye osnovy vibrodiagnosticheskogo monitoringa porshnevyykh mashin v real'nom vremeni [Scientific and methodological foundations of vibration diagnostic monitoring of reciprocating machines in real time]. *Omsk*, 2012. 423 p. (In Russ.).
27. Костюков В. Н., Науменко А. П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 360 с. ISBN 978-5-8149-1101-8. EDN: QMHFH.
- Kostyukov V. N., Naumenko A. P. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and monitoring of machines]. *Omsk*, 2011. 360 p. ISBN 978-5-8149-1101-8. EDN: QMHFH. (In Russ.).
28. Орлов А. И. Основные идеи контроллинга статистических методов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2025. № 210. С. 317–347. DOI: 10.21515/1990-4665-210-033. EDN: TBBTIC.
- Orlov A. I. Osnovnyye idei kontrollinga statisticheskikh metodov [The main ideas of statistical methods controlling]. *Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2025. No. 210. P. 317–347. DOI: 10.21515/1990-4665-210-033. EDN: TBBTIC. (In Russ.).
29. Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Дышлевский В. А., Рольгейзер В. А. Вероятностно-статистические методы принятия решений: применение ROC-анализа в технической диагностике // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 8 (326). С. 4–17. DOI: 10.14489/td.2025.08.pp.004-017. EDN: REQULO.
- Kudryavtseva I. S., Naumenko A. P., Dyshlevskiy V. A., Rol'geyzer V. A. Veroyatnostno-statisticheskiye metody prinyatiya resheniy: primeneniye ROC-analiza v tekhnicheskoy diagnostike []. *Kontrol'. Diagnostika. Journal of Russian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics*. 2025. Vol. 28. No. 8 (326). P. 4–17. DOI: 10.14489/td.2025.08.pp.004-017. EDN: REQULO. (In Russ.).
30. Кудрявцева И. С., Науменко А. П., Демин А. М., Одинец А. И. Вероятностно-статистический критерий оценки состояния по параметрам виброакустического сигнала // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 113–122. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-113-122. EDN: EYLIAI.
- Kudryavtseva I. S., Naumenko A. P., Demin A. M., Odinets A. I. Veroyatnostno-statisticheskiy kriteriy otsenki sostoyaniya po parametram vibroakusticheskogo signala [Probabilistic and statistical criterions for assessing the condition by vibroacoustic signal parameters]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 113–122. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-113-122. EDN: EYLIAI. (In Russ.).
31. Демин А. М., Науменко А. П., Одинец А. И., Горчакова А. А. Оценка вероятностных ошибок контроля состояния теплообменного оборудования // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7, № 2. С. 95–103. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-95-103. EDN: KJPDXY.
- Demin A. M., Naumenko A. P., Odinets A. I., Gorchakova A. A. Otsenka veroyatnostnykh oshibok kontrolya sostoyaniya teploobmennogo oborudovaniya [Probability mistakes evaluation of the heat-exchange equipment condition monitoring]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 95–103. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-95-103. EDN: KJPDXY. (In Russ.).
32. Блягоз З. У., Попова А. Ю. Принятие решений в условиях риска и неопределенности // Вестник Адыгейского государственного университета. 2006. № 4. С. 164–168. EDN: KAOVEZ.
- Blyagoz Z. U., Popova A. Yu. Prinyatiye resheniy v usloviyakh riska i neopredelennosti [Decision-making in conditions of risk and uncertainty]. *Vestnik Adygeyskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2006. No. 4. P. 164–168. EDN: KAOVEZ. (In Russ.).
33. Fawcett T. An introduction to the condition by ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, № 8. P. 861–874. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
34. Stehman S. V. Selecting and interpreting measures of thematicclassification accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 62, № 1. P. 77–89. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
35. Narayanan V., Arora I., Bhatia A. Fast and Accurate sentiment classification using an enhanced Naive Bayes Model. *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. P. 194–201. DOI: 10.1007/978-3-642-41278-3_24.

36. Wu X., Kumar V., Quinlan J. R., Ghosh J. [et al.]. Top 10 algorithms in data mining. *Knowledge and Information Systems*. 2007. Vol. 14, № 1. P. 1–37. DOI: 10.1007/s10115-007-0114-2.

37. Malla C., Panigrahi I. Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*. 2019. Vol. 7. P. 407–414. DOI: 10.1007/s42417-019-00119-y.

38. Костюков В. Н. Разработка элементов теории, технологии и оборудования систем мониторинга агрегатов нефтехимических комплексов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2001. 21 с.

Kostyukov V. N. Razrabotka elementov teorii, tekhnologii i oborudovaniya sistem monitoringa agregatov neftekhimicheskikh kompleksov [Development of elements of theory, technology and equipment of monitoring systems for aggregates of petrochemical complexes]. Moscow, 2001. 21 p. (In Russ.).

39. Петрухин В. В., Петрухин С. В. Вибрация, вибродиагностика и ... ЭЦН: монограф. Москва: Русайнс, 2022. 186 с. ISBN 978-5-466-01822-6. EDN: NKDSWO.

Petrukhin V. V., Petrukhin S. V. Vibratsiya, vibrodiagnostika i ... ETsN [Vibration, vibration diagnostics and ... EDCP]. Moscow, 2022. 186 p. ISBN 978-5-466-01822-6. EDN: NKDSWO. (In Russ.).

40. Dmitriev S. A., Khalyasmaa A. I. Power equipment technical state assessment principles. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 492. P. 531–535. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.492.531.

41. Кирдищев Д. В. Применение метода Байеса при выявлении дефектов топливной аппаратуры по виброакустическим характеристикам во время работы дизеля // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2021. Т. 4, № 1. С. 92–99. EDN: MMINUO.

Kirdishchev D. V. Primeneniye metoda BayYesa pri vyyavlenii defektov toplivnoy apparatury po vibroakusticheskim kharakteristikam vo vremya raboty dizelya [Application of the bayes method for detecting defects in fuel equipment by vibroacoustic characteristics during the operation of a diesel engine]. Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Sukhogo. *Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 92–99. EDN: MMINUO. (In Russ.).

42. Губарев П. В., Шашал А. С., Шабаяев В. В. Распознавание диагнозов неисправности технической системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 322–326. EDN: OPXBVB.

Gubarev P. V., Shapshal A. S., Shabayev V. V. Raspoznavaniye diagnozov neispravnosti tekhnicheskoy sistemy [Recognition of fault diagnoses technical system]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. *Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020. No. 10. P. 322–326. EDN: OPXBVB. (In Russ.).

43. Грунтович Н. В., Кирдищев Д. В. Применение метода Вальда при выявлении дефектов топливных форсунок дизеля // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: сб. мат. междунар. науч.-тех. конф. Брянск, 2023. С. 99–105. EDN: VHKTG.

Gruntovich N. V., Kirdishchev D. V. Primeneniye metoda Val'da pri vyyavlenii defektov toplivnykh forsunok dizelya. *Problemy Energoobespecheniya, Avtomatizatsii, Informatizatsii i Prirodopol'zovaniya v APK*. Bryansk, 2023. P. 99–105. EDN: VHKTG. (In Russ.).

44. Чокоей В. З. Инструменты принятия диагностических решений по объектам авиатехники в условиях неопределённости и риска // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2016. № 2. С. 20–31. EDN: WAQOVV.

Chokoy V. Z. Instrumenty prinyatiya diagnosticheskikh resheniy po ob'yektam aviatekhniki v usloviyakh neopredelannosti i riska [Tools of non-parametric estimate of aircraft equipment reliability with censored data]. Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovaniye, yazyk. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*. 2016. No. 2. P. 20–31. EDN: WAQOVV. (In Russ.).

45. Ямалиев В. У., Мамалимова И. Р. Статистический подход при оценке технического состояния породоразрушающего инструмента // Материалы 47-й Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием. Октябрьский: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. С. 712–715. EDN: OAYHED.

Yamaliyev V. U., Mamalimova I. R. Statisticheskiy podkhod pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya porodorazrushayushchego instrumenta [Statistical approach to evaluating the technical condition of the breeding destructing instrument]. *Materialy 47-y Vseros. Nauch.-Tekhn. Konf. Molodykh Uchenykh, Aspirantov i Studentov s Mezhdunar. Uchastiyem*. Oktabrskiy, 2020. P. 712–715. EDN: OAYHED. (In Russ.).

46. Марасанов В. В., Шарко А. О., Шарко О. В. Системная классификация критериев оценки технического состояния объектов по источникам акустических сигналов // Вестник Херсонского национального технического университета. 2016. Т. 56, № 1. С. 51–60. EDN: WBKHVD.

Marasnov V. V., Shariko A. O., Shariko O. V. Sistemnaya klassifikatsiya kriteriyev otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya ob'yektov po istochnikam akusticheskikh signalov [System classification criteria of estimation the technical state of objects on sources of acoustic signals]. Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2016. Vol. 56, no. 1. P. 51–60. EDN: WBKHVD. (In Russ.).

ДЫШЛЕВСКИЙ Вячеслав Александрович, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; научный сотрудник ООО «ВС инжиниринг», г. Омск.

SPIN-код: 4433-7455

AuthorID (РИНЦ): 1262001

ORCID: 0009-0002-2207-7423

Адрес для переписки: dva_08_99@mail.ru

КУДРЯВЦЕВА Ирина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5117-9041

AuthorID (РИНЦ): 797354

ORCID: 0000-0003-1627-667X

Адрес для переписки: s_iren@mail.ru

НАУМЕНКО Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2568-5406

AuthorID (РИНЦ): 243994

ORCID: 0000-0002-0583-7809

Адрес для переписки: arnaumenko@omgtu.ru

РОЛЬГЕЙЗЕР Варвара Андреевна, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск; старший преподаватель Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.

SPIN-код: 3389-2580

AuthorID: 1287111

ORCID: 0009-0003-2301-8369

Адрес для переписки: chanel-gerl@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 25.04.2025; одобрена после рецензирования 15.10.2025; принята к публикации 30.10.2025.

DYSHLEVSKIY Vyacheslav Aleksandrovich, Postgraduate of the Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk; Researcher, LLC "VS Engineering", Omsk.

SPIN-code: 4433-7455

AuthorID (RSCI): 1262001

ORCID: 0009-0002-2207-7423

Correspondence address: dva_08_99@mail.ru

KUDRYAVTSEVA Irina Sergeyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-код: 5117-9041

AuthorID (RSCI): 797354

ORCID: 0000-0003-1627-667X

Correspondence address: s_iren@mail.ru

NAUMENKO Aleksandr Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2568-5406

AuthorID (RSCI): 243994

ORCID: 0000-0002-0583-7809

Correspondence address: apnaumenko@omgtu.ru

ROLGEYZER Varvara Andreyevna, Postgraduate of the Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk; Senior Lecturer, Omsk State University of Railway Transport, Omsk.

SPIN-код: 3389-2580

AuthorID (RSCI): 1287111

ORCID: 0009-0003-2301-8369

Correspondence address: chanel-gerl@mail.ru

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

The article was submitted 25.04.2025; approved after reviewing 15.10.2025; accepted for publication 30.10.2025.



ОТКРЫТ ПРИЕМ ЗАЯВОК НА ТРЕТИЙ СОВМЕСТНЫЙ КОНКУРС РНФ И ВЬЕТНАМСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК И ТЕХНОЛОГИЙ (VAST)

Российский научный фонд совместно с **Вьетнамской академией наук и технологий (VAST)** открывают конкурс проектов фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований международными научными коллективами.

Срок приема заявок до 17:00 (мск) 22 декабря 2025 года

Гранты выделяются на осуществление научных исследований в 2027–2029 гг. по следующим отраслям знаний:

1. Математика, информатика и науки о системах.
2. Физика и науки о космосе.
3. Химия и науки о материалах.
4. Биология и науки о жизни.
5. Фундаментальные исследования для медицины.
6. Сельскохозяйственные науки.
7. Науки о Земле.
8. Инженерные науки.

Размер одного гранта составит от 4 до 7 млн рублей ежегодно.

Финансирование получают проекты, которым удастся получить положительную оценку независимых экспертов обеих стран.

Результаты конкурса будут подведены **30 июня 2026 года**.

Подробная информация и конкурсная документация доступны на сайте РНФ <https://rscf.ru/contests/>

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