

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

2023

№ 4 (188)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издаётся с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 4 (188) 2023

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 15.11.2023 г.
Дата выхода в свет 28.11.2023 г.

Формат 60x84 1/8. 19,53 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 165
Цена свободная

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

КОСЫХ Анатолий Владимирович, главный редактор, д. т. н., профессор,
Омский государственный технический университет, г. Омск

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

НОВИКОВ Алексей Алексеевич, д. т. н., профессор,
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., профессор,
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, к. т. н., профессор,
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

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 (188) 2023

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 15.11.2023
Date of Publication 28.11.2023

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 19,53
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 165
Open Price

EDITORIAL STAFF

KOSYKH Anatoly Vladimirovich (Chief Editor), D. Sc. (Technical), Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

POPOV Evgeniy Vladimirovich, D. Sc. (Technical), Professor,
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. А. Панчук, Т. М. Мясоедова. Поверхность нелинейного вращения	5
Е. В. Попов, И. Н. Шоркина. Автоматизация моделирования поверхности судового корпуса	13
Ф. Н. Притыкин, И. С. Кузнецов. Геометрическое моделирование процесса выполнения работ по копанью прямых траншей при ремонте трубопровода	22
С. И. Ротков, Е. В. Конопацкий, К. А. Панчук. Проблема сокращения кафедр геометро-графической подготовки в университетах России	29
В. Н. Сызранцев, А. И. Стариков. Синтез адаптивной цилиндрической передачи с арочными зубьями с двумя зонами контакта	38
В. Ю. Соломин, С. В. Белькова, В. Ю. Соломин. Подбор пылеочистительного оборудования типа циклон для металлообрабатывающих производств при помощи Метода анализа иерархий	46
М. О. Шальнев, Я. В. Денисова, А. Ф. Батталов. Повышение экономической эффективности работы ООО «Газпром трансгаз Казань» при эксплуатации подогревателей газа на газораспределительной станции	53

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. В. Кашуба, А. В. Шевкунова. Построение алгоритма управления с целью повышения энергоэффективности вентильно-индукторного электродвигателя	60
Е. Е. Мирошниченко. Высоконадежный вентильно-индукторный двигатель для системы тягового электропривода железнодорожного подвижного состава	70
О. В. Тарасенко, Ю. В. Креселюк, М. Н. Ивлев. Исследование зависимости градиента магнитного поля от параметров упрочненного слоя стали при импульсном магнитном методе неразрушающего контроля	77
Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко. Анализ длительно допустимых токов и потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических факторов	84
В. М. Троценко. Анализ температуры и сравнение потерь активной мощности в нестационарном и стационарном тепловом режиме воздушных линий электропередачи	93
А. О. Парамзин. Разработка способа селективного определения линии с однофазным замыканием на землю для промышленных сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью при преобладании несинусоидальной нагрузки	100
В. А. Ткаченко. Разработка метода определения структуры мини-сети с учетом оптимальных маршрутов линий электропередачи на территории с резко неоднородным ландшафтом	109

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Е. А. Абидова, В. И. Ратушный. Регистрация и обработка сигналов в измерительном комплексе контроля протечек трубопроводной арматуры атомной электростанции	117
В. С. Ковивчак, А. А. Парыгин. Влияние предварительной термической обработки на морфологию углеродного слоя, формирующегося на поверхности хлорированного поливинилхлорида при воздействии мощного ионного пучка	125
А. Н. Ляшук, А. В. Косых. Проектирование термокомпенсированного кварцевого генератора в САПР Keysight ADS	132
В. В. Федянин, В. В. Шалай, В. К. Федоров, П. С. Ячменев, И. С. Вавилов. Мостовой резонансный источник питания электродугового двигателя малого космического аппарата	140
В. В. Ерохин, С. А. Завьялов. Автоматизированный синтез топологий интегральных сверхвысокочастотных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания	152
Т. П. Макарова, А. Н. Батуру, Ю. Н. Безбородов. Результаты исследования горения твердых веществ в закрытом объеме	162

CONTENTS

MECHANICAL

K. L. Panchuk, T. M. Myasoyedova. The surface of non-linear rotation	5
E. V. Popov, I. N. Shorkina. Automation of ship hull surface simulation	13
F. N. Pritykin, I. S. Kuznetsov. Geometric modeling of the process of digging trench pits during pipeline repair	22
S. I. Rotkov, E. V. Konopatskiy, K. L. Panchuk. The problem of reduction of geometry and graphic training departments in Russian universities	29
V. N. Syzrantsev, A. I. Starikov. Synthesis of an adaptive cylindrical gear with arched teeth with two contact zones spaced along the length of the tooth	38
V. Yu. Solomin, S. V. Belkova, V. Yu. Solomin. Selection of dust cleaning equipment such as cyclone for metalworking industries using the Hierarchy Analysis Method	46
M. O. Shalnev, Ya. V. Denisova, A. F. Battalov. 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	53

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

A. V. Kashuba, A. V. Shevkunova. Construction of the control algorithm to improve energy efficiency of a switched reluctance electric motor	60
E. E. Miroshnichenko. Highly reliable switched reluctance motor for the traction electric drive system of railway rolling stock	70
O. V. Tarasenko, Yu. V. Kreselyuk, M. N. Ivlev. The study of the dependence of magnetic field gradient on parameters of the part being tested by the pulsed magnetic non-destructive testing method	77
E. V. Petrova, S. S. Girshin, V. A. Krivolapov, V. N. Goryunov, V. M. Trotsenko. The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors	84
V. M. Trotsenko. Temperature analysis and comparison of active power losses in non-stationary and stationary thermal conditions of overhead power lines	93
A. O. Paramzin. Development of selective line detection method with single-phase earth fault for industrial 6–35 kV networks with isolated neutral with non-sinusoidal load	100
V. A. Tkachenko. Development of a method for determining the structure of mini-grid, taking into account optimal routes of power lines in an area with sharply heterogeneous landscape	109

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

E. A. Abidova, V. I. Ratushny. Registration and signal processing in measuring system for monitoring leaks of NPP pipeline fittings	117
V. S. Kovivchak, A. A. Parygin. The influence of preliminary heat treatment on morphology of carbon layer formed on surface of chlorinated polyvinyl chloride under the impact of a high-power ion beam	125
A. N. Lyashuk, A. V. Kosykh. Temperature compensated crystal oscillator design in Keysight ADS	132
V. V. Fedyanin, V. V. Shalay, V. K. Fedorov, P. S. Yachmenev, I. S. Vavilov. Full-Bridge power resonant converter for the arcjet thruster of a small spacecraft	140
V. V. Erokhin, S. A. Zavyalov. Automated synthesis of integrated microwave LC-filters layouts with passband losses minimization	152
T. P. Makarova, A. N. Baturo, Yu. N. Bezborodov. Results of a study on combustion of solids in an enclosed volume	162

УДК 514.7
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-5-12
EDN: VF CPSL

К. Л. ПАНЧУК
Т. М. МЯСОЕДОВА

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОВЕРХНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ВРАЩЕНИЯ

В работе рассмотрены геометрическая схема, математическая модель и алгоритм формообразования поверхности нелинейного вращения. Известно, что в евклидовой геометрии и механике преобразование вращения является линейным, при этом расстояние и угол являются его инвариантами. Авторами предложена геометрическая схема нелинейного вращения, в которой осью вращения служит гладкая пространственная кривая, а объектом вращения является также гладкая линия. Доказаны несколько предложений, лемма и теорема, которые позволяют формировать исходные данные в задаче нелинейного вращения, решением которой являются параметрические уравнения гладких поверхностей. Результаты исследований позволяют расширить многообразие циклических поверхностей в существующей классификации аналитических поверхностей. Они также могут быть полезными при создании САПР, в которых предусматривается проектирование поверхностных форм изделий машиностроения, строительства, архитектуры и других практических областей, на основе циклических поверхностей.

Ключевые слова: гладкая кривая, подвижный трехгранник, поверхность нелинейного вращения, алгоритм формообразования, циклическая поверхность.

Введение. В геометрии и кинематике известно понятие «вращение». В евклидовой геометрии оно связано с ортогональным преобразованием «вращение», в результате применения которого геометрический объект приобретает новое положение на плоскости или в пространстве, достигаемое поворотом вокруг точки или прямой линии. В кинематике рассматривается вращательное движение твердого тела вокруг точки — центра вращения или вокруг прямой линии — оси вращения, сопровождаемое кинематическими характеристиками точек тела: скоростями и ускорениями. При вращении объекта вокруг прямой линии каждая его точка описывает круговую траекторию в некоторой плоскости. Множество таких плоскостей представляет собой пучок с несобственной осью, перпендикулярной оси вращения объекта, т.е. пучок параллельных плоскостей. Представляет интерес более сложный случай, когда плоскости круговых траекторий точек образуют нелинейный пучок, что возможно в случае криволинейной оси вращения, для которой этот

пучок представляет собой множество её нормальных плоскостей. При этом осью вращения и центром круговой траектории точки объекта служит соответствующая касательная и её точка касания с криволинейной осью. Известно несколько работ, посвященных исследованию нелинейного вращения и его практическим приложениям. В работах [1, 2] рассматривается алгебраический подход для построения обобщенной поверхности вращения, основанный на введении функций, формирующих алгоритм аналитического описания взаимосвязи геометрий двух линий — линий центров вращения и линии радиусов. При этом вне рассмотрения оставлен анализ влияния геометрии и взаимного расположения указанных двух линий на геометрию конструируемой обобщенной поверхности вращения. В работах [3, 4] введено понятие «квазивращение», как обобщение понятия «вращение», применительно к криволинейной оси вращения, в качестве которой используются кривые второго порядка. В работах не рассматривалось использо-

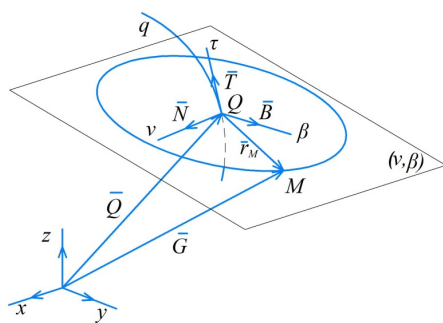


Рис. 1. Схема образования траектории вращения точки M

вание пространственных кривых в качестве осей вращения.

В настоящей работе предлагается геометрическая схема формообразования поверхности нелинейного вращения для общего случая задания базовых элементов схемы, а именно криволинейной оси вращения и образующей линии. Рассмотрены числовые примеры, иллюстрирующие работу алгоритма формообразования в соответствии с предложенной схемой. Предложенная поверхность нелинейного вращения относится к классу циклических поверхностей, широко используемых в качестве динамических поверхностей, взаимодействующих с рабочей средой (газы, жидкости, сыпучие материалы). Они принадлежат к многообразию каналовых поверхностей [5, 6], использование которых в современной промышленности часто сопряжено с возникновением новых практических задач, например, оптимальное размещение каналовых поверхностей в ограниченных и сложноорганизованных пространствах [7, 8]. При этом в качестве заданной принимается ось каналовой поверхности, а образующий поверхность элемент представляет собой линию или дискретный ряд точек, ограничивающих форму поверхности по условиям окружающей её пространственной обстановки. Для решения таких задач требуются новые подходы, методы и алгоритмы формообразования каналовых, в том числе циклических, поверхностей.

Математическая модель поверхности нелинейного вращения. Рассматривается геометрическая схема формообразования поверхности нелинейного вращения (ПНВ) и даётся её аналитическое описание. Для этих целей используется известный в дифференциальной геометрии метод подвижного (сопровождающего) трёхгранника Френе, изложенный в фундаментальных работах математиков-геометров: В. Бляшке [9], Э. Картана [10], Д. Н. Зейлигера [11] и мн. др. В отечественных исследованиях в области инженерной геометрии и её практических приложений этот метод достаточно широко представлен в работах [5, 6, 12–16].

1. Вращение точки относительно криволинейной оси. Вращение точки выполняется в нормальной плоскости заданной криволинейной оси вокруг центра — точки кривой, через которую проходит нормальная плоскость. В качестве оси нелинейного вращения используется гладкая кривая q : $\bar{Q}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$, $t \in [t_0, t_n] \in \mathbf{R}$, $\bar{Q}'(t) = \frac{d\bar{Q}}{dt} \neq 0$. Схема вращения точки приведена на рис. 1.

1.1. Плоскость вращения точки. Построим подвижный трехгранник кривой q в её точке Q :

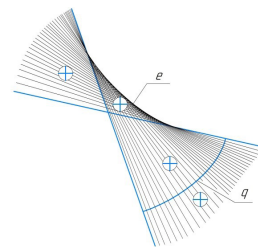


Рис. 2. Проекция областей допустимых положений точки

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

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

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

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

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

Принадлежность точки $M(x_M, y_M, z_M)$ к нормальной плоскости (v, β) линии q выражается уравнением:

$$F(t) = \bar{Q}'(t) \cdot (\bar{G} - \bar{Q}(t)) = 0, \quad (1)$$

где $\bar{G} = \{x_M, y_M, z_M\}$.

Из уравнения $F(t) = 0$ следует значение параметра $t = t_Q \in [t_0, t_n]$, которое соответствует заданной точке M и определяет положение нормальной плоскости (v, β) .

Очевидно, не для каждой точки M пространства можно построить нормальную плоскость (v, β) . Рис. 2 даёт некоторое представление о сути этой проблемы. Предположим, что q — сегмент плоской криволинейной оси вращения. Тогда все нормальные плоскости сегмента q образуют отсек пучка плоскостей, огибающей которых служит отсек цилиндрической поверхности с направляющей линией в форме сегмента эволюты e линии q . Очевидно, допустимые положения точки M для выполнения ею вращения относительно сегмента криволинейной оси q находятся в тех частях пространства R^3 , ортогональные проекции которых на плоскости оси вращения q отмечены знаком $\oplus$.

В случае если ось нелинейного вращения q — пространственная кривая, то положение точек пространства, для которых допустимо нелинейное вращение относительно q , определяется более сложной геометрической конфигурацией, разделяющей пространство на допустимые и недопустимые области положения этих точек. Конфигурация включает следующие элементы: пространственную ось вращения q , нелинейный пучок нормальных плоскостей оси q и торсовую поверхность, огибающую этих нормальных плоскостей.

1.2. Расстояние между точками пространства при их вращении относительно криволинейной оси. Вектор $\bar{r}_M$ точки M имеет следующие проекции в локальной системе координат $Q\tau\beta$, образованной ортами подвижного трехгранника: $\bar{r}_M = \{\tau_M = 0, v_M, \beta_M\}$. Матрица перехода из неподвижной декартовой системы координат $Oxyz$ в подвижную локальную систему координат $Q\tau\beta$

с началом в точке Q и обратная матрица имеют соответственно вид:

$$A(t) = \begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T \\ x_N & y_N & z_N \\ x_B & y_B & z_B \end{bmatrix}, \quad A^{-1}(t) = \begin{bmatrix} x_T & x_N & x_B \\ y_T & y_N & y_B \\ z_T & z_N & z_B \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из схемы на рис. 1 следует:

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

или в развернутом виде:

$$\begin{bmatrix} \tau_M = 0 \\ v_M \\ \beta_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_T & y_T & z_T \\ x_N & y_N & z_N \\ x_B & y_B & z_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_M - x \\ y_M - y \\ z_M - z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\bar{G}$ — радиус-вектор точки M в системе координат $Oxyz$. Очевидно,

$$r_M = |\bar{r}_M| = |\bar{G} - \bar{Q}| = \sqrt{\tau_M^2 + v_M^2 + \beta_M^2}.$$

Уравнения траектории $c_M \subset (v, \beta)$ вращения точки M в локальной системе координат $Q\tau\beta$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \tau_{(M)} &= 0, \quad v_{(M)} = r_M \cdot \cos(\lambda \cdot 2\pi), \\ \beta_{(M)} &= r_M \cdot \sin(\lambda \cdot 2\pi), \quad \lambda \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении (4) имеет место: $v_{(M)} = v_{(M)}(t = t_Q, \lambda)$, $\beta_{(M)} = \beta_{(M)}(t = t_Q, \lambda)$, где t_Q — значение параметра t , полученное из уравнения (1). Уравнения окружности (4) позволяют получить уравнение трубчатой поверхности при $r_M = \text{const}$:

$$\begin{aligned} \bar{G}(t, \lambda) &= A^{-1}(t) \cdot \bar{r}_{(M)}(\lambda) + \bar{Q}(t), \\ |\bar{r}_{(M)}| &= |\bar{r}_M| = r_M = \text{const}, \\ \bar{r}_{(M)} &= \{\tau_{(M)} = 0, v_{(M)}, \beta_{(M)}\}. \end{aligned}$$

Предложение 1: поворот двух различных точек евклидова пространства относительно гладкой кривой оси на равные углы изменяет расстояние между точками, если только точки не принадлежат одной и той же нормальной плоскости кривой.

Доказательство. Пусть M_1 и M_2 — точки в нормальных плоскостях соответственно (v_1, β_1) и (v_2, β_2) исходной криволинейной оси вращения q (рис. 3). Расстояние между ними $\rho(M_1, M_2)$. Повернем обе точки на один и тот же угол φ — каждую в своей нормальной плоскости (v_1, β_1) и (v_2, β_2) соответственно. Поворот выполним относительно центров $Q_1 = (v_1, \beta_1) \cap q$ и $Q_2 = (v_2, \beta_2) \cap q$ по круговым траекториям. Укажем расстояние $\rho(M'_1, M'_2)$, полученное в результате равных поворотов точек M_1 и M_2 . Докажем, что $\rho(M_1, M_2) \neq \rho(M'_1, M'_2)$. Предположим, что $\rho(M_1, M_2) = \rho(M'_1, M'_2)$. Две четверки точек в пространстве, а именно: M_2, Q_2, Q_1, M_1 и M'_2, Q'_2, Q'_1, M'_1 , можно представить как вершины образующихся тетраэдров M_2, Q_2, Q_1, M_1 и M'_2, Q'_2, Q'_1, M'_1 , полученных один из другого некоторым движением с сохранением расстояния $\rho(M_1, M_2) = \rho(M'_1, M'_2)$. В этом движении общее ребро тетраэдров $Q_1 Q_2$ неподвижно, а пары точек M_1 и M'_1 , M_2 и M'_2 образованы вращением на один и тот же угол φ относительно центров Q_1 и Q_2 , принадлежащих ребру. В соответствии с известной в теоретической механике теорией движения твердого тела, движение тела определя-

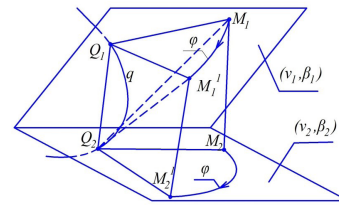


Рис. 3. К доказательству неравенства $\rho(M_1, M_2) \neq \rho(M'_1, M'_2)$

ется движением его трех различных точек, не принадлежащих одной прямой.

В рассматриваемом случае две точки Q_1 и Q_2 , как и все точки прямой (Q_1, Q_2) , закреплены. Поэтому движение твердого тела — тетраэдра M_1, M_2, Q_2, Q_1 , для всех остальных его точек представляет собой вращение вокруг неподвижной оси (Q_1, Q_2) , в котором сохраняется расстояние для любой пары его различных точек, в том числе $\rho(M_1, M_2) = \rho(M'_1, M'_2)$. Но поскольку (Q_1, Q_2) — ось вращения, то плоскости круговых траекторий всех точек тетраэдра M_1, M_2, Q_2, Q_1 должны быть перпендикулярны оси вращения (Q_1, Q_2) , т.е. должны образовывать пучок параллельных плоскостей, и в этом пучке имеет место $(v_1, \beta_1) \parallel (v_2, \beta_2)$. Получаем противоречие, поскольку нормальные плоскости исходной пространственной кривой q образуют нелинейный пучок, в котором плоскости (v_1, β_1) и (v_2, β_2) не параллельны. Таким образом, предположение о том, что $\rho(M_1, M_2) = \rho(M'_1, M'_2)$ неверно. Поэтому $\rho(M_1, M_2) \neq \rho(M'_1, M'_2)$.

2. Нелинейное вращение линии. Нелинейное вращение линии, как однопараметрического множества точек, представляет собой вращение каждой её точки относительно заданной криволинейной оси. Нелинейное вращение линии формирует некоторую циклическую поверхность, которую назовём поверхностью нелинейного вращения (ПНВ). Целесообразность введения названия «Поверхность нелинейного вращения» обусловлена следующими обстоятельствами:

1. Нормальные плоскости криволинейной оси вращения, которым принадлежат круговые траектории точек образующей линии, образуют нелинейный пучок.

2. Образом прямой линии при её вращении относительно криволинейной оси является кривая линия (см. ниже рассмотренный пример 1).

Пусть гладкая кривая линия (образующая) q : $\bar{G}(l) = \{x(l), y(l), z(l)\}$, $l \in [l_0, l_n] \in \mathbf{R}$, $\bar{G}'(l) = \frac{d\bar{G}}{dl} \neq 0$ вращается относительно гладкой криволинейной оси q : $\bar{Q}(t) = \{x(t), y(t), z(t)\}$, $t \in [t_0, t_n]$, $\bar{Q}'(t) \neq 0$ (рис. 4).

В этом вращении точка $M \in \bar{G}(l)$ принадлежит нормальной плоскости (v, β) оси вращения $\bar{Q}(t)$ в её точке Q . Выразим это обстоятельство уравнением:

$$\bar{Q}'(t) \cdot (\bar{G}(l) - \bar{Q}(t)) = 0. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует функциональная зависимость $l = f(t)$, при этом выполняется условие $f'(t) = \frac{df}{dt} \neq 0$. Действительно, предположим, что $f'(t) = 0$. Тогда $f(t) = a$, где a — некоторая константа. В таком случае вектор-функция $\bar{G}(l) = \bar{G}(f(t)) = \bar{G}(l = a)$ будет представлять собой некоторый постоянный вектор, соответствующий точке пространства, для которого характерно $\bar{G}'(l) = 0$. Но поскольку изначально была введена не точка, а гладкая линия q :

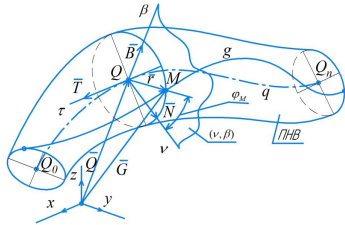


Рис. 4. Схема образования ПНВ

$\bar{G}(l) = \{x(l), y(l), z(l)\}$, $l \in [l_0, l_n] \in \mathbf{R}$, $\bar{G}'(l) \neq 0$, то из полученного противоречия следует справедливость утверждения того, что $f'(t) \neq 0$. Таким образом, доказано **предложение 2**: функция $f(t)$ из уравнения (5) является гладкой.

Рассмотренное предложение обеспечивает гомеоморфное соответствие числовых отрезков $[l_0, l_n]$ и $[t_0, t_n]$, из которого следует такое же соответствие точек пространственных кривых линий $\bar{Q}(t)$ и $\bar{G}(l)$.

Исходя из принятой схемы формообразования ПНВ (рис. 4), получаем

$$\bar{r}(t) = A(t) \cdot (\bar{G}(f(t)) - \bar{Q}(t)), \quad (6)$$

где $\bar{r}(t)$ — радиус-вектор точки образующей линии $\bar{G}(l)$ в локальной системе координат $Qnv\beta$, $A(t)$ — матрица (2) перехода от неподвижной системы координат $Oxyz$ к локальной системе координат $Qnv\beta$ подвижного трехгранника, образованного ортами $\bar{T}(t)$, $\bar{B}(t)$ и $\bar{N}(t)$. Определим угловое положение текущей точки M образующей кривой линии $\bar{G}(l)$ в локальной системе координат $Qnv\beta$: $\text{tg}(\varphi(t_Q)) = \frac{\beta(t_Q)}{v(t_Q)}$, где $\beta(t_Q)$ и $v(t_Q)$ — декартовы координаты точки M в локальной системе координат, t_Q — текущее значение параметра t в точке Q на оси вращения $\bar{Q}(t)$, соответствующее значению l_M параметра $l = f(t)$ точки M на образующей $\bar{G}(l)$.

Уравнение текущей круговой траектории c_M точки M при $t = t_Q$, $t_Q \in [t_0, t_n]$, имеет вид:

$$\begin{aligned} v_M(t_Q, \lambda) &= r(t_Q) \cdot \cos \psi(t_Q, \lambda); \\ \beta_M(t_Q, \lambda) &= r(t_Q) \cdot \sin \psi(t_Q, \lambda), \end{aligned} \quad (7)$$

где $r(t_Q) = |\bar{r}(t_Q)|$, $\psi(t_Q, \lambda) = \varphi(t_Q) + 2\pi \cdot \lambda$, $\lambda \in [0, 1]$. Уравнение непрерывного семейства окружностей $\{c_M\}$ в системе координат $Oxyz$ имеет вид:

$$\bar{W}(t, \lambda) = A^{-1}(t) \cdot \bar{r}(t, \lambda) + \bar{Q}(t), \quad (8)$$

где $\bar{r}(t, \lambda) = \{\tau = 0, v(t, \lambda), \beta(t, \lambda)\}$. Уравнение (8) описывает ПНВ с образующей линией $\bar{G}(l)$ и криволинейной осью $\bar{Q}(t)$. Схема алгоритма формообразования ПНВ представлена на рис. 5.

Обратимся к уравнению (6). Оно описывает кривую g , принадлежащую нормальной плоскости (v, β) криволинейной оси $\bar{Q}(t)$. Эта кривая представляет собой след образующей линии $\bar{G}(l)$, формируемый в процессе последовательного пересечения нормальной плоскости (v, β) подвижного трехгранника с линией $\bar{G}(l)$. Из уравнения (6) следует:

$$\bar{r}'_t = A' \cdot (\bar{G}(f(t)) - \bar{Q}(t)) + A(t) \cdot (\bar{G}'_t \cdot f'_t - \bar{Q}'_t), \quad (9)$$

$$\text{где } \bar{r}'_t = \frac{d\bar{r}}{dt}, \quad A' = \frac{dA}{dt}, \quad \bar{G}'_t \cdot f'_t = \frac{\partial \bar{G}}{\partial f} \cdot \frac{df}{dt}, \quad \bar{Q}'_t = \frac{d\bar{Q}}{dt}.$$

Рассмотрим оба слагаемых в уравнении (9). Множитель $A' \neq 0$, поскольку это производная матрицы-функции, элементами которой являются направляющие косинусы ортов $\bar{T}(t)$, $\bar{B}(t)$ и $\bar{N}(t)$ подвижного трёхгранника оси $\bar{Q}(t)$. Множитель $(\bar{G}(f(t)) - \bar{Q}(t))$ — это ненулевой вектор на прямой, соединяющей соответственные точки $Q \in \bar{Q}(t)$ и $M \in \bar{G}(f(t))$ линий q и g , заведомо не пересекающихся между собой. Производные $\bar{G}'_t$, f'_t и $\bar{Q}'_t$ — каждая не равна нулю; $\bar{G}'_t$ и $\bar{Q}'_t$ не равны нулю, поскольку изначально рассматриваются гладкие линии $\bar{Q}(t)$ и $\bar{G}(l)$, где

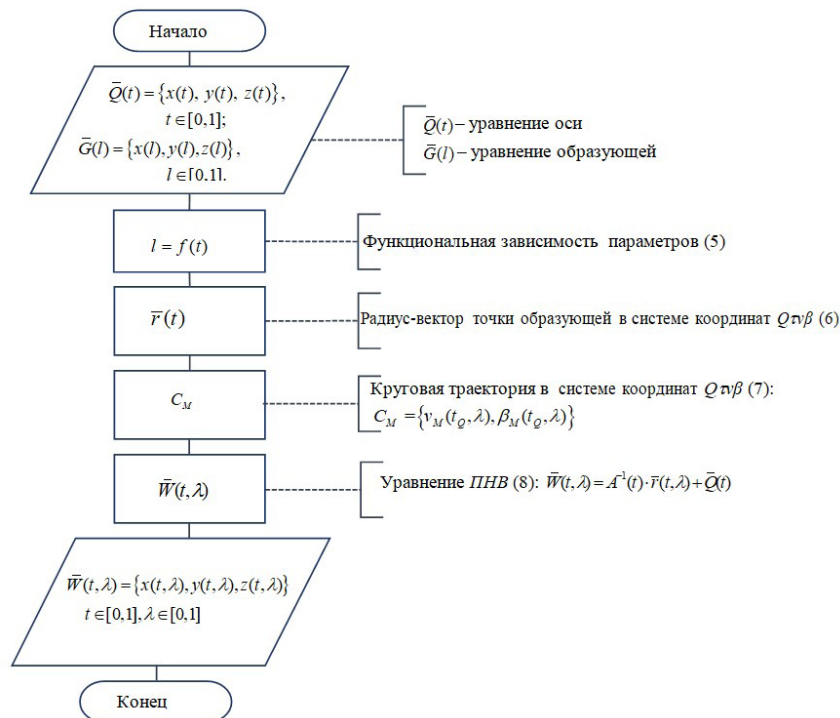


Рис. 5. Схема алгоритма формообразования ПНВ

$l = f(t)$; $f'_t \neq 0$ по предложению 2. Множитель $(\bar{G}'_t \cdot f'_t - \bar{Q})$ описывает разность двух касательных векторов в соответственных точках $M \in \bar{G}(f(t))$ и $Q \in \bar{Q}(t)$, которая может быть нулевым вектором, что не влияет, с учетом неравенства $A' \cdot (\bar{G}(f(t)) - \bar{Q}(t)) \neq 0$, на результат $\bar{r}' \neq 0$. Таким образом, доказано **предложение 3**: след $\bar{r}(t)$ гладкой образующей $\bar{G}(l)$, формируемый в нормальной плоскости (v, β) гладкой оси вращения $\bar{Q}(t)$, является гладкой линией.

Уравнение (8) при фиксированном значении параметра $\lambda = a \in [0, 1]$ описывает некоторую пространственную кривую в системе координат $Oxyz$:

$$\bar{W}(t, \lambda = a) = A^{-1}(t) \cdot \bar{r}(t, \lambda = a) + \bar{Q}(t). \quad (10)$$

Эта кривая получена из образующей линии $\bar{G}(l)$ поворотом каждой её точки в соответствующей этой точке нормальной плоскости (v, β) криволинейной оси $\bar{Q}(t)$ на угол $\psi(t, \lambda = a) = \varphi(t) + 2\pi \cdot a$. Вектор-функция $\bar{r}(t, \lambda = a)$ в уравнении (10) описывает плоскую кривую g_a — след кривой (10) в нормальной плоскости (v, β) . Как показано выше, уравнение кривой g_a может быть записано в проекционном виде

$$\bar{r}(t, \lambda = a) = \{v(t, \lambda = a), \beta(t, \lambda = a)\}$$

в локальной системе координат $Q\tau v\beta$, где

$$v(t, \lambda = a) = r(t) \cdot \cos \psi(t, \lambda = a);$$

$$\beta(t, \lambda = a) = r(t) \cdot \sin \psi(t, \lambda = a);$$

$$r(t) = |\bar{r}(t)|.$$

Рассмотрим производную $\bar{r}'(t, \lambda = a) = \{v'(t, \lambda = a), \beta'(t, \lambda = a)\}$, где

$$\bar{v}'(t, \lambda = a) = \frac{d\bar{v}}{dt} =$$

$$= \bar{r}'(t) \cdot \cos \psi(t, \lambda = a) - r(t) \sin \psi(t, \lambda = a) \cdot \varphi'(t),$$

$$\bar{\beta}'(t, \lambda = a) = \frac{d\bar{\beta}}{dt} =$$

$$= \bar{r}'(t) \cdot \sin \psi(t, \lambda = a) + r(t) \cos \psi(t, \lambda = a) \cdot \varphi'(t).$$

Очевидно, $r(t) \neq 0$, $r'(t) \neq 0$, поскольку из предложения 3 следует $\bar{r}'(t) \neq 0$. Кроме того, из гладкости функции $\bar{r}(t) = \{v(t), \beta(t)\}$ следует гладкость функции $\varphi = \arctg\left(\frac{\beta(t)}{v(t)}\right)$ на отрезке $[t_0, t_n]$. В результате получаем, что $\bar{r}'(t, \lambda = a) \neq 0$. Таким образом, доказано **предложение 4**: след $\bar{r}(t, \lambda = a)$ кривой линии $\bar{W}(t, \lambda = a)$, формируемый в нормальной плоскости (v, β) гладкой криволинейной оси $\bar{Q}(t)$, является гладкой кривой.

Рассмотрим примеры.

Пример 1. Задана криволинейная ось q уравнением $\bar{Q}(t) = \{50t^2, 100t, -40t^2\}$, $t \in [0, 1]$. Образующая линия g задана уравнением прямой линии $\bar{G}(l) = \{20l + 60, 100l, 15l - 15\}$, $l \in [0, 1]$. Требуется построить ПНВ.

Решение. Схема алгоритма формообразования ПНВ представлена на рис. 5. По уравнению (5) определяем функциональную зависимость параметров $l = f(t)$: $l = \frac{t(41t^2 + 26)}{2(8t + 25)}$. На основании уравнения (7) формируется текущая

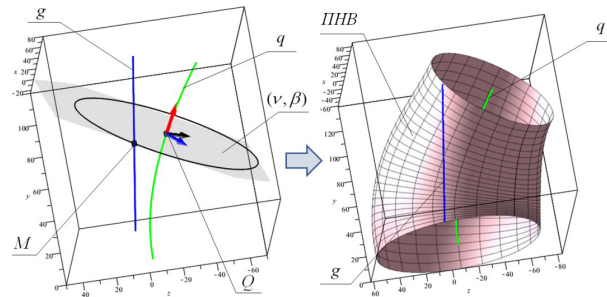


Рис. 6. Формообразование ПНВ на основе вращения прямой линии

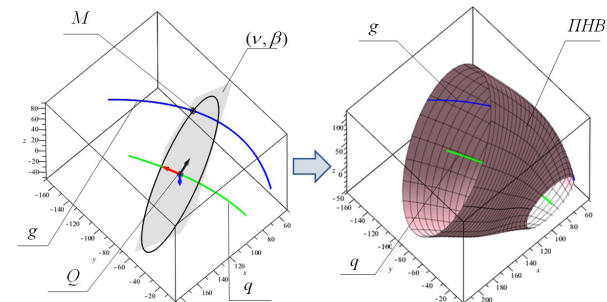


Рис. 7. Формообразование ПНВ на основе вращения кривой линии

круговая траектория c_M точки M образующей линии при $t = t_Q$, $t_Q \in [t_0, t_n]$: $v_M = H \cdot \cos(2\pi \cdot \lambda)$, $\beta_M = H \cdot \sin(2\pi \cdot \lambda)$,

$$H = \frac{2,5}{8t_Q + 25} \times \sqrt{672441t_Q^6 - 100t_Q(5248t_Q^4 + 65t_Q^2 - 3462) - 4t_Q^2(68183t_Q^2 + 40271) + 382500},$$

где $\lambda \in [0, 1]$. Используя зависимость (8), определяем уравнение искомой ПНВ:

$$\bar{W}(t, \lambda) = (x(t, \lambda), y(t, \lambda), z(t, \lambda)), t \in [0, 1], \lambda \in [0, 1].$$

Визуализация результатов вычислений приведена на рис. 6.

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

Решение. Уравнение ПНВ определяется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 5. По уравнению (5) выразим функциональную зависимость параметров $l = f(t)$:

$$l = \frac{\sqrt{625(41t^4 + 25) + 4t(11719t - 4625)} - (t + 125)}{125t}.$$

По уравнению (6) определяем радиус-вектор $\bar{r}(t)$ точки образующей линии $\bar{G}(f(t))$ в локальной системе координат $Q\tau v\beta$: $\bar{r}(t) = (x_r(t), y_r(t), z_r(t))$. Исходя из уравнений (7) и (8), определяем уравнение ПНВ: $\bar{W}(t, \lambda) = (x(t, \lambda), y(t, \lambda), z(t, \lambda))$, $t \in [0, 1], \lambda \in [0, 1]$.

Визуализация результатов вычислений приведена на рис. 7.

Предложение 4 позволяет сформулировать лемму.

Лемма: кривая линия $\bar{W}(t, \lambda = a)$, как текущее положение гладкой образующей кривой $\bar{G}(l)$ при её вращении относительно гладкой криволинейной оси $\bar{Q}(t)$, является гладкой кривой.

Действительно, из уравнения (10), с учетом вышеизложенного, следует

$$\begin{aligned} \bar{W}'(t, \lambda = a) &= \frac{d\bar{W}}{dt} = \\ &= (A^{-1}(t))' \cdot \bar{r}(t, \lambda = a) + A^{-1}(t) \cdot \bar{r}'(t, \lambda = a) + \bar{Q}'(t) \neq 0. \end{aligned}$$

Предложения 3, 4 и лемма позволяют сформулировать и доказать теорему.

Теорема: при вращении гладкой кривой линии относительно гладкой криволинейной оси образуется гладкая ПНВ, если эти линии не имеют общих точек.

Доказательство. Из уравнения ПНВ (8) следует существование на ней координатной сети (t, λ) , состоящей из семейств линий (t) , представляющего собой множество гладких линий $\bar{W}(t, \lambda = a), a \in [0, 1]$, и семейства гладких линий (λ) , представляющего собой множество окружностей $\bar{W}(t = t_0, \lambda), t_0 \in [t_0, t_n]$. Следовательно, в любой точке (t, λ) на ПНВ существует вектор нормали $\bar{N} = [\bar{W}'_t, \bar{W}'_\lambda]$ к поверхности, отличный от нулевого вектора.

Выводы. Исследование закономерностей и особенностей формообразования одних из наиболее востребованных на практике нормальных циклических поверхностей (НЦП) позволило получить следующие результаты:

1. Разработаны общая геометрическая схема и общий алгоритм формообразования ПНВ, которые позволяют существенно расширить многообразие известных НЦП [17–22].

2. Доказанные в работе предложения, лемма и теорема определяют требования к исходным данным в задаче формообразования НЦП как ПНВ.

3. Рассмотренные вычислительные примеры подтверждают работоспособность и вычислительную эффективность предложенного алгоритма формообразования НЦП.

Предложенное математическое описание процесса формообразования НЦП, использующее параметрические уравнения получаемых поверхностей, может быть успешно применено в создаваемых САПР, в которых предусматривается проектирование поверхностных форм изделий машиностроения, строительства, архитектуры и других практических областей, на основе циклических поверхностей.

Библиографический список

1. Григорьев М. И. Построение обобщенных поверхностей вращения // Семинар «DNA&CAGD». Избранные доклады. 2007. С. 1–7. URL: <http://dha.spb.ru/PDF/GeneralizedRevolution.pdf> (дата обращения: 27.02.2023).
2. Григорьев М. И., Малозёмов В. Н. Составные кривые и поверхности Безье. Аналитический подход. Lambert Academic Publishing, 2010. 132 с. ISBN 978-3-8433-0323-1.
3. Беглов И. А., Рустамьян В. В. Метод вращения геометрических объектов вокруг криволинейной оси // Геометрия и графика. 2017. № 3. С. 45–50. DOI: 10.12737/article_59bfa4eb0bf488.99866490. EDN: ZGWEMP.
4. Beglov I. A. Computer geometric modeling of quasi-rotation surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057.
5. Осипов В. А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей. Москва: Машиностроение, 1979. 248 с.

6. Осипов В. А., Осипова Л. И. Теоретические основы каркасно-кинематического метода направляющей линии // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1980. № 4. С. 48–53.

7. Маркин Л. В., Корн Г. В., Куи М. Х. [и др.]. Дискретные модели геометрического моделирования компоновки авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. 16 с. EDN: VUDSTD.

8. Хтун Н. Н. Разработка и исследование рецепторных геометрических моделей телесной трассировки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014. 26 с.

9. Бляшке В. Дифференциальная геометрия и геометрические основы теории относительности Эйнштейна. В 2 т. Т. 1. Элементарная дифференциальная геометрия. Москва; Ленинград: Объединенное науч.-техн. изд-во НКТП СССР, 1935. 330 с.

10. Картан Э. Теория конечных непрерывных групп и дифференциальная геометрия, изложенные методом подвижного репера / пер. с фр. С. П. Финикова Москва: Изд-во Платон, 1998. 366 с. ISBN 5-80100-297-9.

11. Зейлигер Д. Н. Комплексная линейчатая геометрия. Москва; Ленинград: Гос. техн.-теорет. изд-во, 1934. 196 с.

12. Якубовский А. М. Некоторые вопросы конструирования поверхностей с помощью трехгранника Френе // Труды Ун-та дружбы народов им. П. Лумумбы. Москва, 1967. Т. 26. С. 23–32.

13. Panchuk K. L., Niteyskiy A. S. Contact of the Ruled Nondevelopable Surfaces // Proceedings of the 16th International Conference on Geometry and Graphics, 4–8 August 2014. Innsbruck: University Press, 2014. P. 216–223.

14. Нитейский А. С. Конструирование торсовой поверхности методом подвижного трехгранника Френе // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 151–153. EDN: RNEIEX.

15. Корчагин Д. С., Панчук К. Л. Метод геометро-динамического формообразования линейчатых полос // Вестник КузГТУ. 2013. Вып. 6 (100). С. 89–92. EDN: RUDWXXJ.

16. Korchagin D. S., Panchuk K. L. Forming of the Spline Similar Linear Strip // Proceedings of the 16th International Conference on Geometry and Graphics, 4–8 August 2014. Innsbruck: Innsbruck University Press, 2014. P. 428–436.

17. Кривошапко С. Н. Энциклопедия аналитических поверхностей [более 500 поверхностей, 38 классов: математикам, инженерам, архитекторам]. Москва: URSS, 2009. 556 с. ISBN 978-5-397-00985-0.

18. Кривошапко С. Н., Иванов В. Н. Классификация циклических поверхностей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. № 2. С. 25–34.

19. Krivoshapko S., Hyeng C. Geometrical research of rare types of cyclic surfaces // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2012. Vol. 12, no. 3. P. 346–359. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057.

20. Bock Hyeng Ch. A., Yamb E. B. Application of Cyclic Shells in Architecture, Machine Design, and Bionics // International Journal of Modern Engineering Research. 2012. Vol. 2, no. 3. P. 799–806.

21. Иванов В. Н., Шмелева А. А. Геометрия и формообразование тонкостенных пространственных конструкций на основе нормальных циклических поверхностей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 6. С. 3–8. EDN: WYOLRL.

22. Иванов В. Н., Рынкoвская М. И. Применение циклических поверхностей в архитектуре зданий, конструкций и изделий // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Инженерные исследования. 2015. № 3. С. 111–119. EDN: ULXYJH.

ПАНЧУК Константин Леонидович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» Омского госу-

дарственного 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, старший преподаватель 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

Для цитирования

Панчук К. Л., Мясоедова Т. М. Поверхность нелинейного вращения // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-5-12.

Статья поступила в редакцию 27.06.2023 г.

© К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова

UDC 514.7

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-5-12

EDN: VFCPSL

**K. L. PANCHUK
T. M. MYASOYEDOVA**

**Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia**

THE SURFACE OF NON-LINEAR ROTATION

The paper considers a geometric scheme, a mathematical model and an algorithm for shaping a non-linear rotation surface. It is known that in Euclidean geometry and mechanics the transformation of rotation is linear, while distance and angle are its invariants. The authors proposed a geometric scheme of non-linear rotation, in which the axis of rotation is a smooth spatial curve and the object of rotation is a smooth line. Several propositions, a lemma and a theorem are proved, which allow one to form the initial data in the problem of nonlinear rotation, the solution of which is the parametric equations of smooth surfaces. The research results make it possible to expand the variety of cyclic surfaces in the existing classification of analytic surfaces. They can also be useful in the creation of CAD, which provides for the design of surface forms of products for mechanical engineering, construction, architecture and other practical areas based on cyclic surfaces.

Keywords: smooth curve, movable trihedron, non-linear rotation surface, shaping algorithm, cyclic surface.

References

1. Grigor'yev M. I. Postroyeniye obobshchennykh poverkhnostey vrashcheniya [Construction of generalised rotation surfaces] // Seminar «DNA&CAGD». Izbrannyye doklady. Seminar «DNA&CAGD». Izbrannyye Doklady. 2007. P. 1–7. URL: <http://dha.spb.ru/PDF/GeneralizedRevolution.pdf> (accessed: 27.02.2023) (In Russ.).
2. Grigor'yev M. I., Malozemov V. N. Sostavnyye krivyye i poverkhnosti Bez'ye. Analiticheskiy podkhod [Compound curves and Bézier surfaces. The analytical approach]. Lambert Academic Publishing, 2010. 132 p. ISBN 978-3-8433-0323-1. (In Russ.).
3. Beglov I. A., Rustamyan V. V. Metod vrashcheniya geometricheskikh ob'yektov vokrug krivolinyeynoy osi [Method of rotation of geometrical objects around the curvilinear axis] // Geometriya i grafika. Geometry and Graphics. 2017. No. 3. P. 45–50. DOI: 10.12737/article_59bfa4eb0bf488.99866490. EDN: ZGWEMP. (In Russ.).
4. Beglov I. A. Computer geometric modeling of quasi-rotation surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057. (In Engl.).
5. Osipov V. A. Mashinnyye metody proyektirovaniya nepreryvnokarkasnykh poverkhnostey [Machine-assisted design methods for continuous frame surfaces]. Moscow, 1979. 248 p. (In Russ.).
6. Osipov V. A., Osipova L. I. Teoreticheskiye osnovy karkasno-kinemacheskogo metoda napravlyayushchey linii [Theoretical foundations of the frame-kinematic guide line method] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Aviatsionnaya Tekhnika. 1980. No. 4. P. 48–53. (In Russ.).
7. Markin L. V., Korn G. V., Kui M. Kh. [et al.]. Diskretnyye modeli geometricheskogo modelirovaniya komponovki aviatsionnoy tekhniki [Discrete models of aircraft equipment layout geometric modeling] // Trudy MAI. Proceedings of MAI. 2016. No. 86. 16 p. EDN: VUDSTD. (In Russ.).
8. Khtun N. N. Razrabotka i issledovaniye retseptornykh geometricheskikh modeley telesnoy trassirovki [Development and research of receptive geometric models of body tracing]. Moscow, 2014. 26 p. (In Russ.).
9. Blyashke V. Differentsial'naya geometriya i geometricheskiye osnovy teorii otnositel'nosti Eynshteyna. V 2 t. T. 1. Elementarnaya differentsial'naya geometriya. [Differential

geometry and the geometrical foundations of Einstein's theory of relativity. In 2 vols. Vol. 1. Elementary differential geometry]. Moscow; Leningrad, 1935. 330 p. (In Russ.).

10. Kartan E. Teoriya konechnykh nepreryvnykh grupp i differentsial'naya geometriya, izlozhennyye metodom podvizhnogo repera [Theory of finite and continuous groups and differential geometry treated by the moving frame method] / trans. from. fr. S. P. Finikova. Moscow, 1998. 368 p. ISBN 5-80100-297-9. (In Russ.).

11. Zeyliger D. N. Kompleksnaya lineychataya geometriya [Complex linear geometry]. Moscow; Leningrad, 1934. 196 p. (In Russ.).

12. Yakubovskiy A. M. Nekotoryye voprosy konstruirovaniya poverkhnostey s pomoshch'yu trekhgrannika Frene [Some issues of surface construction with the Fresnier trihedron] // Trudy un-ta Druzhby Narodov im. P. Lumumby. *Proceedings of the P. Lumumba Peoples' Friendship University*. Moscow, 1967. Vol. 26. P. 23–32. (In Russ.).

13. Panchuk K. L., Niteyskiy A. S. Contact of the Ruled Nondevelopable Surfaces // *Proceedings of the 16th International Conference on Geometry and Graphics*, 4–8 August 2014. Innsbruck: University Press, 2014. P. 216–223. (In Engl.).

14. Niteyskii A. S. Konstruirovaniye torsovoy poverkhnosti metodom podvizhnogo trekhgrannika Frene [Design of ruled surfaces by moving Frenet trihedron] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2013. No. 2 (120). P. 151–153. EDN: RNEIEX. (In Russ.).

15. Korchagin D. S., Panchuk K. L. Metod geometrodinamicheskogo formoobrazovaniya lineychatykh polos [Methods of geometry-dynamic shaping linear strips] // *Vestnik KuzGTU. Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2013. Issue 6 (100). P. 89–92. EDN: RUDWXJ. (In Russ.).

16. Korchagin D. S., Panchuk K. L. Forming of the Spline Similar Linear Strip // *Proceedings of the 16th International Conference on Geometry and Graphics*. Innsbruck, Austria. 2014. P. 428–436. (In Engl.).

17. Krivoschapko S. N. Entsiklopediya analiticheskikh poverkhnostey: boleye 500 poverkhnostey, 38 klassov: matematikam, inzheneram, arkhitektoram [Encyclopedia of analytical surfaces: more than 500 surfaces, 38 classes: mathematicians, engineers, architects]. Moscow, 2010. 556 p. ISBN 978-5-397-00985-0. (In Russ.).

18. Krivoschapko S. N., Ivanov V. N. Klassifikatsiya tsiklicheskikh poverkhnostey [Classification of cyclic surfaces] // *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy. Structural Mechanics of Engineering Structures and Facilities*. 2006. No 2. P. 25–34. (In Russ.).

19. Krivoschapko S., Hyeng C. Geometrical research of rare types of cyclic surfaces // *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 2012. Vol. 12, no. 3. P. 346–359. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057. (In Engl.).

20. Bock Hyeng Ch. A., Yamb E. B. Application of Cyclic Shells in Architecture, Machine Design, and Bionics // *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012. Vol. 2, no. 3. P. 799–806. (In Engl.).

21. Ivanov V. N., Shmeleva A. A. Geometriya i formoobrazovaniye tonkostennykh prostranstvennykh konstruktsiy na osnove normal'nykh tsiklicheskikh poverkhnostey [Geometry and formation of the thin-walled space shell structures on the base of normal cyclic surfaces] // *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy. Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures*. 2016. No 6. P. 3–8. EDN: WYOLRL. (In Russ.).

22. Ivanov V. N., Rynkovskaya M. I. Primeneniye tsiklicheskikh poverkhnostey v arkhitekture zdaniy, konstruktsiy i izdeliy [Application of circular surfaces to the architecture of the buildings, structures and products] // *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser. Inzhenernyye issledovaniya. Rudn Journal of Engineering Research*. 2015. No 3. P. 111–119. EDN: ULXYJH. (In Russ.).

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

SPIN-code: 5623-0008

AuthorID (RSCI): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Correspondence address: Panchuk_KL@mail.ru

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

SPIN-code: 6056-6455

AuthorID (RSCI): 686836

ORCID: 0000-0002-9641-9417

AuthorID (SCOPUS): 57201776004

ResearcherID: E-7505-2014

Correspondence address: mtm44mtm44@mail.ru

For citations

Panchuk K. L., Myasoyedova T. M. The surface of nonlinear rotation // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-5-12.

Received June 27, 2023.

© K. L. Panchuk, T. M. Myasoyedova

¹ Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет,
г. Нижний Новгород

² Волжский государственный
университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород

АВТОМАТИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СУДОВОГО КОРПУСА

В статье представлен модифицированный алгоритм автоматизированного формирования геометрической модели поверхности судового корпуса. Показано, что использование разработанного алгоритма построения NURBS-поверхностей позволяет в несколько раз снизить трудоемкость проведения работ по сравнению с использованием ручного труда при моделировании поверхностей в стандартных судостроительных системах моделирования типа SeaSolution, Rhino и других. Кроме того, актуальность данного исследования существенно возрастает в условиях зарубежного санкционного давления в плане импортозамещения. На основе данного алгоритма создано программное приложение, реализованное с использованием языков HTML5, JavaScript. Приложение позволяет решать задачи создания и отображения трехмерных моделей судовых поверхностей в стандартном интернет-браузере. Программа позволяет оперативно анализировать варианты геометрии модели корпуса судна путем корректировки исходных данных, что существенно повышает производительность труда конструктора. Предусмотрен экспорт сформированной NURBS-поверхности для использования в других системах проектирования, в том числе для моделирования конструкций корпуса судна, проведения расчетов остойчивости, раскроя обшивки и решения других задач.

Ключевые слова: кривая NURBS, поверхность NURBS, поверхность корпуса судна, геометрическая модель, языки программирования JavaScript, HTML5.

Введение. Внедрение полного цикла *CALS/ИППИ* (Информационная Поддержка жизненного цикла Изделия) — технологии в судостроении является одной из главных задач отрасли [1–4]. Специалисты конструкторских бюро ведущих предприятий отмечают, что конкурентоспособное проектирование начинается с моделирования электронной модели судового корпуса. Выверенная геометрическая электронная модель обеспечивает дальнейшее качество работы с внутренним насыщением корпуса и с конструированием внешней оснастки [5, 6].

Компьютерное моделирование поверхности вручную зачастую приводит к ошибкам сглаживания, что влечет за собой критические затруднения при гибке и сварке листов обшивки [7]. Важно выполнять работу по созданию геометрической поверхности, обладающей монотонной гладкостью, по крайней мере, второго порядка. При этом все изменения должны быть интерактивными, в реальном режиме и легко доступными для пользователя [8]. Выглаженная поверхность позволяет достигать качественного построения разверток листов обшивки [9].

Проблема создания качественной поверхности корпуса корабля имеет большое значение при ав-

томатизированном проектировании судов. Гладкость второго порядка этих поверхностей является одним из важнейших условий точности изготовления конструкций корпуса корабля. Это приводит к экономии времени и повышению качества сборки и сварки корпуса. А также значительно снижает стоимость конструкции. В настоящее время используется несколько методов контроля качества поверхности судов:

1. Визуализация гауссовой кривизны, позволяющая выявить проблемные участки поверхности корпуса корабля.
2. Визуализация радиусов кривизны кривых, поверхностей и сечений.
3. Визуализация точек перегиба и линий перегиба сечений и поверхностей.
4. Динамическое изменение линий перегиба и кривизны при ручном редактировании поверхности.
5. Визуализация поверхностей и сечений в сжатом виде по одной из осей координат. Это очень важная функция для моделирования поверхностей, сильно вытянутых по одной из осей координат (крылья, руль и т. д.).
6. Автоматический контроль отклонения поверхности от исходных данных.

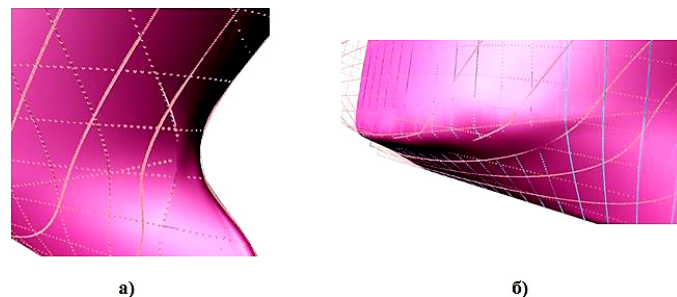


Рис. 1. Неточности алгоритма:
а) разрыв координат и производных в месте стыковки носовой и срединной поверхности; б) неточность моделирования скулового слома

Описанные средства контроля качества поверхности позволяют практически полностью отказаться от бумажных чертежей (или, по крайней мере, свести их к минимуму), а также существенно сократить время моделирования и повысить качество моделируемой поверхности [10]. При проектировании поверхности корпуса корабля с помощью судостроительных CAD-систем основной целью является сокращение ручного труда. Преимущества использования полностью или частично автоматизированного построения поверхности корпуса судна совершенно очевидны. Для проектировщика высокой квалификации качественная работа по формированию гладкой, монотонной поверхности в стандартных системах геометрического моделирования вручную занимает примерно 40 часов. Как правило, это зависит от возможностей графической программы, в которой реализуется проект, и от опыта специалиста. С целью снижения временных затрат в статье [11] был представлен автоматизированный алгоритм построения электронной геометрической модели поверхности судового корпуса. При анализе полученных результатов было выявлено неточное моделирование поверхности в области острой скулы корпуса судна, а также примыкание носовой оконечности и средней части корпуса.

Данная работа посвящена описанию модифицированного алгоритма построения судовой поверхности, позволяющего избежать неточностей построения, упомянутых выше.

Описание алгоритма. Одним из основных требований к разработанному алгоритму являлось максимально близкое прилегание поверхности к заданному массиву точек по всей площади корпуса, в том числе и в зонах, прилегающих к носовой оконечности производной формы, а также зонам интенсивного изменения геометрии. Обычно такими зонами являются острые скуловые линии корпусов некоторых типов судов.

Анализ неточностей алгоритма (рис. 1), описанного в работе [11], показал, что зачастую появляющиеся на этапе построения поверхности ее несовершенства могут быть следствием невысокого качества теоретического чертежа (ТЧ), являющегося источником исходных данных для построения. Низкое качество ТЧ может проявляться в плохой согласованности его основных линий, шпангоутов, батоксов, ватерлиний, что влечет появление бухтин, вмятин на поверхности и ее волнистость, это во-первых. Во-вторых, раздельное формирование поверхностей в разных зонах корпуса разными методами может привести к появлению разрывов поверхности и ее производных на границах

стыковки частей поверхности (рис. 1а). В-третьих, в районах особенностей типа скуловых сломов поверхность плохо отслеживает реальную геометрию корпуса (рис. 1б).

Модифицированный алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Как отмечалось в работе [11], исходной информацией для алгоритма являются линии шпангоутов, батоксов и ватерлиний ТЧ в формате DXF. Эти линии размещаются в трехмерном пространстве на своих числовых отметках для формирования каркасной модели корпуса судна. Затем средствами CAD системы (в большинстве случаев это AutoCAD) на основе этих линий генерируется облако точек, причем оптимальным для большинства конструкций корпуса судна является количество точек 300–400 по линиям батоксов и ватерлиний по их длине, и 60–90 — для линий шпангоутов.

2. Опытная эксплуатация алгоритма показала, что в большинстве случаев точки, расположенные на батоксах (за исключением диаметрального батокса) практически не влияют на качество и точность построения поверхности. Поэтому в дальнейшем эти точки рекомендуется исключить из модели во избежание их отрицательного влияния на вычислительный процесс. Кроме того, удаляются все совпадающие друг с другом в пространстве точки, поскольку для алгоритма эта ситуация является критичной. Все манипуляции с облаком точек наиболее удобно выполнять в рамках системы КЗ [12]. Подготовленное облако точек экспортируется в текстовый файл специально созданной макрокоманды системы КЗ:

```
defarr xm[15];
```

```
fname="F:\\Ship Hull_experiment\\Models\\Hull_2.xyz";
```

```
// _____ Выбор и сохранение точек
```

```
i=0;
lab_1:
i=i+1;
If (i<=sysv) {
if (GetObjType(GetObjNum(i)) == 1) {
rr=GetObjGeo(GetObjNum(i),xm);
str1=Str(xm[1]);
str2=Str(-xm[2]);
str3=Str(xm[3]);
str_all=str1+" "+str3+" "+str2;
pos=0;
if (i==1) {pos=-1;}
st=PutStr(fname,str_all,pos);
```

```

}
goto lab_1;
}
exit;

```

3. Система координат, в которой следует разместить полученное облако, ориентирована следующим образом: начало координат помещается как можно ближе к корме, ось X направляется от кормы в носовую часть, ось Z — вверх. Ось Y направляется таким образом, чтобы система координат образовывала правую тройку (рис. 2). Теоретические шпангоуты нумеруются от начала координат (0-вой шп.) в направлении носовой части. При наличии шпангоутов, расположенных в корму от 0-вого шпангоута, они нумеруются в направлении кормы как -1-ый, -2-ой и т.д.

В текстовом файле последней строкой размещаются значения шести дополнительных параметров, управляющих процессом автоматического формирования поверхности:

Space — Теоретическая шпация

First — Номер шпангоута, до которого будет строиться вся поверхность

Second — Номер шпангоута, до которого будет строиться средняя часть поверхности

Third — шпангоута, до которого будет строиться носовая часть поверхности

Stern — Параметр наличия ахтерштевня (0 — нет, 1 — есть)

Step — Шаг выбора точек на теоретическом шпангоуте (см. ниже)

4. Построение главных линий поверхности производится путем формирования 3D NURBS-кривых с использованием библиотеки *Verb Nurbs* [14]. Первой линией является линия диаметального батокса. Для ее построения из всего облака точек выделяется подмножество точек, координаты которых по оси Y = 0. В подмножестве отыскивается точка, расположенная в верхней части носовой поверхности корпуса путем сравнения координат точек по осям X и Z, эта точка помещается в начале списка точек в подмножестве. Остальные точки выстраиваются в направлении уменьшения значений координат по осям X и Z. Сформированный список используется для построения NURBS-кривой с помощью функции *verb.geom.NurbsCurve.byPoints*. Линия диаметального батокса (ЛДБ) строится до самой последней точки, которая может быть найдена в списке обладающих координатой Y = 0.

5. Построение линии, соответствующей линии планширя фальшборта (ЛПФ), если он есть, на ТЧ. Если же фальшборт не входит в ТЧ, далее строится линия примыкания палубы к наружной обшивке. Первым действием на этом шаге является включение в качестве первой точки в новое подмножество точки, которая является первой в подмножестве, используемом на шаге 4 (см. выше) для построения

ЛДБ. Все последующие точки выбираются из общего множества, исходя из нескольких условий

$$\begin{cases} p_{i+1} = \min(dis(p_i, p_j)) \\ \overrightarrow{dis}(p_i, p_2), \overrightarrow{OY} \neq 0, \\ -0,11 \leq \overrightarrow{dis}(p_i, p_{i+1}), \overrightarrow{OZ} \leq 0,73, \\ \overrightarrow{dis}(p_i, p_{i+1}), \overrightarrow{dis}(p_{i-1}, p_i) \leq -0,89, \end{cases} \quad (1)$$

где $\overrightarrow{dis}(p_i, p_{i+1})$ — нормализованный вектор между точками p_i и p_{i+1} ;

i — номер последней добавленной в подмножество точек;

j — номер следующей искомой точки.

Первое условие в списке (1) означает, что следующая искомая точка в последовательности должна быть ближайшей к последней уже добавленной. Второе условие должно быть проверено при поиске второй точки в последовательности. Вектор от первой точки до второй не должен быть перпендикулярен оси координат Y для исключения из рассмотрения точек, принадлежащих ЛДБ. Третье условие требует, чтобы нормализованный вектор между точками p_i и p_{i+1} лежал бы в пределах от 43° до 97° по отношению к оси Z. Четвертое условие означает, что угол между векторами $\overrightarrow{dis}(p_i, p_{i+1})$ и $\overrightarrow{dis}(p_{i-1}, p_i)$ должен быть не меньше, чем 155° , что гарантирует исключение из рассмотрения уже выбранных точек. Все численные значения углов в условиях (1) выбраны путем тщательного анализа самых разнообразных форм ЛПФ. Поскольку добавление точек в список ведется последовательно с носа в корму, процесс заканчивается, как только произведен выбор точки, координата которой по оси X становится меньше, чем координата по этой же оси теоретического шпангоута, определяемого параметром *First*. Для построения линии также используется функция *verb.geom.NurbsCurve.byPoints*.

6. Третьей, и заключительной линией является линия, соответствующая линии теоретического шпангоута (ЛТШ), определяемая двумя параметрами *Space* и *Third*. Эта линия необходима для раздельного построения носовой и других поверхностей корпуса. Дело в том, что носовая поверхность в большинстве случаев имеет сложную конфигурацию и требует специфических подходов для формирования. Формирование списка сводится к простому выбору точек, координаты которых по оси X соответствуют координатам точек шпангоута. Точки, необходимые для построения линии, лежащие непосредственно на ЛДБ и ЛПФ, отыскиваются с использованием функции *verb.geom.NurbsCurve.closestPoint* для каждой линии и помещаются в начало и в конец списка точек, по которым строится ЛТШ с помощью функции *verb.geom.NurbsCurve.byPoints*.

В этих же точках производится разрыв ЛДБ и ЛПФ для отдельного использования полученных ветвей в построении носовой и срединной поверхностей корпуса судна (рис. 3).

7. Построение поверхности носовой оконечности. Ниже, в пункте 8, описана процедура построения поверхности корпуса в средней части судна на базе линий теоретических шпангоутов. Однако в носовой оконечности данный подход неприменим, поскольку в большинстве случаев носовая оконечность имеет сложную форму, которая теоретические шпангоуты в этой части разрывает на две ветви (рис. 3). В этом случае для построе-

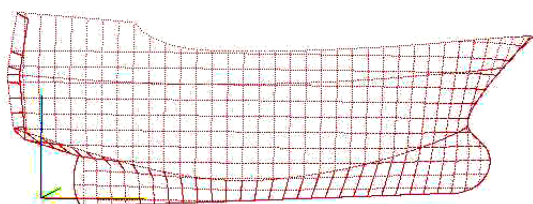


Рис. 2. Положение системы координат

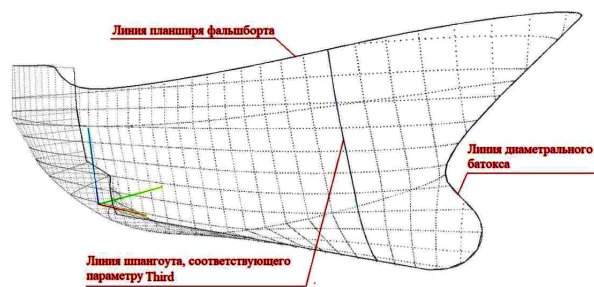


Рис. 3. Главные линии корпуса судна

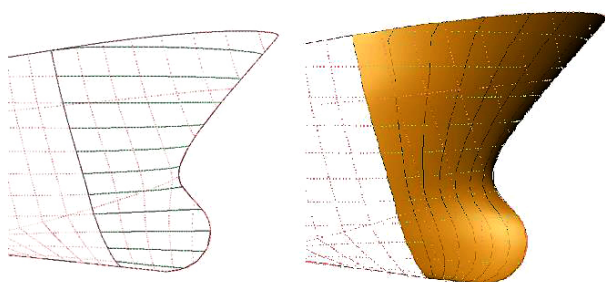


Рис. 4. Построение NURBS-поверхности в носовой части

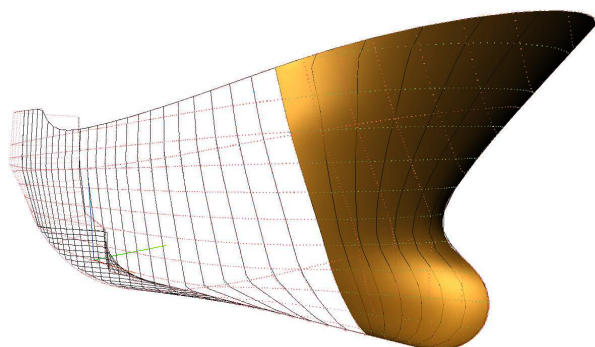


Рис. 5. NURBS-кривые для построения поверхности в средней части

ния поверхности используются точки, принадлежащие ватерлиниям в носовой части. Точки выделяются последовательно для каждой ватерлинии с помощью движущегося снизу вверх узкого сепаратора шириной $Z_{max}/5000$, где Z_{max} — максимальная координата по оси Z точки стыковки двух линий ЛДБ и ЛТШ. По выделенным точкам строятся NURBS-кривые, изображенные на рис. 4. Список линий дополняется двумя ветвями линий ЛДБ и ЛТШ, «подключенными» на шаге 6 путем разрыва этих линий. Данный список линий используется для построения поверхности с помощью функции *verb.geom.NurbsCurve.byPoints*. Поскольку, как показано ниже, алгоритм получения поверхности в средней части и в носу отличаются, произведено переопределение полученной поверхности кривыми другого направления. Для этого к полученной поверхности применена функция *verb.geom.NurbsCurve.isocurve*, позволяющая получить NURBS-кривые по одному из заданных параметрических координат поверхности. Целесообразно количество кривых варьировать от 6 до 8. Данные кривые добавляются в список всех кривых для построения итоговой поверхности.

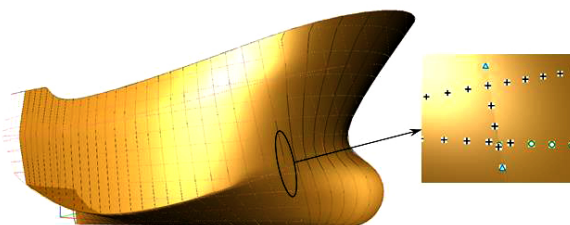


Рис. 6. Разрыв в первых производных NURBS-поверхности носовой и средней поверхностей

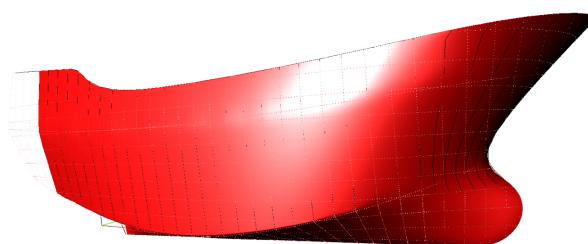


Рис. 7. Объединенная NURBS-поверхность корпуса

8. Построение поверхности в средней части корпуса. В этой части поверхность строится по NURBS-кривым теоретических шпангоутов, для построения которых выбираются из общего списка точки, имеющие координаты соответствующего сечения корпуса от X. Эти координаты вычисляются с использованием номеров шпангоутов в диапазоне между параметрами *Second* и *Third* и параметра *Space*. Для построения кривых теоретических шпангоутов используются не все точки, которые удастся выделить для данного шпангоута из общего списка точек. Точки выбираются из списка точек *i*-го шпангоута с помощью заданного параметра *Step*. Это, с одной стороны, уменьшает количество точек для проведения вычислений, с другой стороны, как видно из рис. 16, у ряда судов имеется острый скуловой слом, который необходимо учитывать при построении кривых. С целью выделения участков кривых в районе скуловых сломов производится проверка скалярного произведения двух векторов между узлами i и $i+1$, а также i и $i-1$ с проверкой условия $(dis(p_i, p_{i+1}) \cdot dis(p_{i-1}, p_i)) \leq -0.97$, что соответствует углу между этими векторами 165° . Если условие выполняется, то точки $i+1$ и $i-1$ также добавляются в общий список для построения кривых. Результат построения кривых с помощью функции представлен на рис. 5.

9. Заключительным шагом является построение итоговой поверхности. Поверхности в средней и носовой части, изображенные на рис. 6, являются NURBS-поверхностями в нашем случае 3-го порядка, непрерывными между собой по значениям координат, однако имеющие разрывы в производных начиная с первого порядка в месте стыковки в районе шпангоута, определяемого параметром *Third*.

Для обеспечения гладкости по всем производным необходимо построить итоговую поверхность от шпангоута *Second* до носовой части. Для этого используется полный список всех кривых от изолиний, найденных на шаге 7, до кривых, использо-

ванных на шаге 8. Определяющим для построения объединённой поверхности на этом шаге является параметр *Stern*, принимающий значение 0 или 1. *Stern* = 1 означает, что в кормовой оконечности есть килевая часть, оканчивающаяся ахтерштевнем, в этом случае параметр *Second* должен быть равен номеру шпангоута, последнему перед ахтерштевнем (рис. 7). В этом случае часть поверхности до кормового транца остается недостроенной. В случае, если параметр *Stern* = 0, достаточно задать *Second* = *First*, при этом поверхность строится вплоть до транца, то есть до шпангоута номер *First*.

10. Особый случай представляет собой *Stern* = 1. В этом случае участок кормовой поверхности между шпангоутами *First* и *Second* приходится достраивать отдельно. Для обеспечения неразрывности поверхностей в средней части и кормовой по координатам шпангоут номер *Second* необходимо разорвать в месте стыка кормового киля и днища (рис. 8) и полученную ветвь использовать как первую кривую для построения поверхности в корме. Остальные кривые строятся в этой части аналогично тому, как описано в пункте 8. По данным кривым строится недостающая часть кормовой поверхности. При этом, однако, наблюдается разрыв по производным начиная с первого порядка. Преодоление данного недостатка предполагается осуществить в последующих версиях алгоритма.

В случае *Stern* = 0 данный пункт алгоритма выполнять не требуется.

Программная реализация алгоритма. Алгоритм, описанный выше, реализован в виде макета программного продукта, предназначенного для автоматизированного построения поверхности корпуса судна по облаку точек, полученному на базе теоретического чертежа. Программный продукт реализован для всех типов персональных ЭВМ как платформо-независимый благодаря использованию языков программирования JavaScript, HTML и CSS. Для реализации программы требуется только наличие стандартного интернет-браузера, поддерживающего библиотеку *WebGL*. Тип и версия операционной системы: Windows 7/8/10/11, размер программы 4,4 Мб.

Для получения входных данных программы необходимо исходный теоретический чертеж корпуса, представленный в формате DXF, преобразовать в трехмерную проволоочную модель, а затем на основе линий модели сгенерировать облако точек, элементы которого совпадают с главными линиями модели (ватерлиниями, батоксами и шпангоутами) с определенным шагом вдоль этих линий. Координаты точек затем с помощью специально созданного макроса на языке макропрограммирования системы КЗ экспортируются в текстовый файл, который является файлом исходных данных программы. Программа на основе полученных исходных данных первоначально полностью автоматически строит главные линии корпуса, а именно линию диаметрального батокса и либо линию стыка палубы и борта судна, либо линию планширя фальшборта, если он присутствует на чертеже. После этого корпус делится на носовой регион, регион средней части корпуса и кормовой регион. Автоматически строятся ватерлинии в носовом регионе, по которым далее генерируется NURBS-поверхность в носу. В средней и кормовой частях автоматически строятся NURBS-линии шпангоутов, по которым далее генерируются NURBS-поверхности в этих регионах. Поверхности в носу и в средней части затем

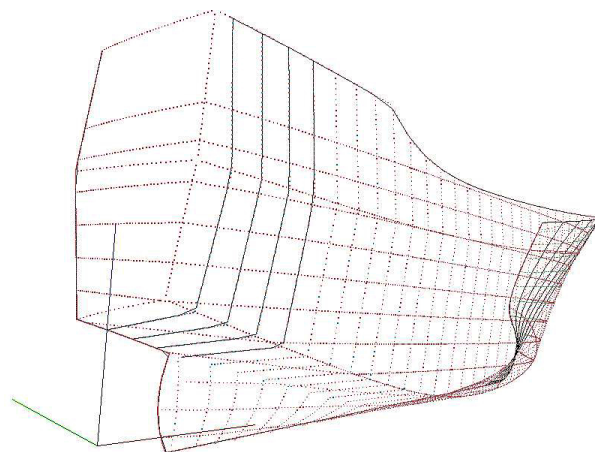


Рис. 8. NURBS-кривые для построения кормовой поверхности при *Stern* = 1

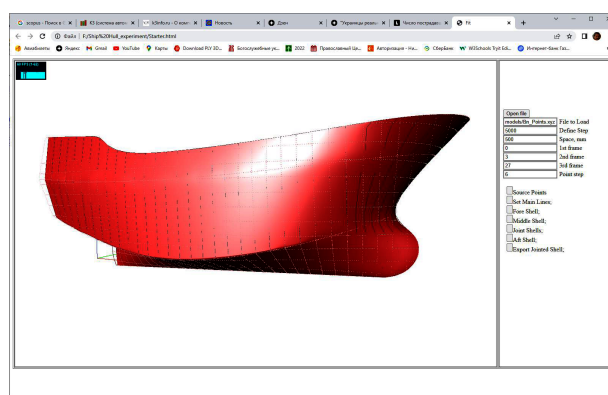


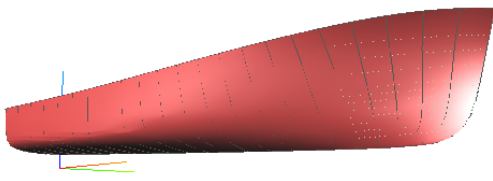
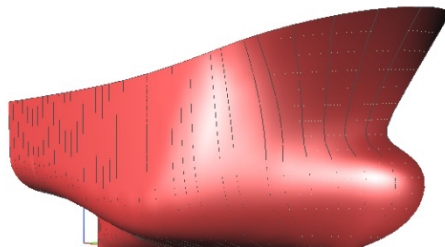
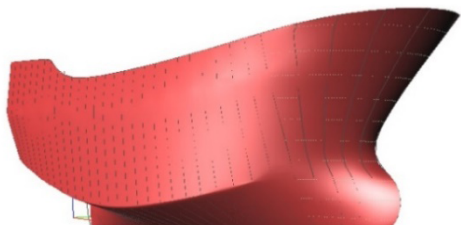
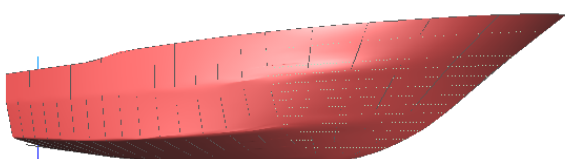
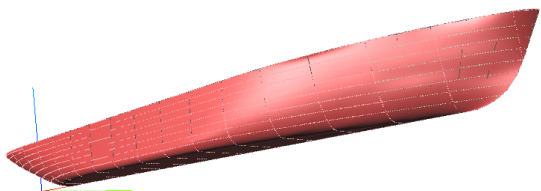
Рис. 9. Пользовательский интерфейс программы

объединяются в одну поверхность, которая далее может быть экспортирована в отдельный файл для использования в CAD-системах проектирования судостроительных конструкций. Имеется также возможность для корпусов некоторых типов в носовой, средней и кормовой части генерировать поверхность как одно целое. Программный продукт осуществляет экспорт сформированной поверхности.

Визуализация всех геометрических элементов, включая поверхности, линии и точки, осуществляется при помощи библиотеки *Three.js* [13], которая обеспечивает удобный интерфейс к функциям библиотеки *WebGL*. Задание кривых произвольной формы возможно двумя способами: указание набора точек и интерполяция гладкой кривой между ними или выбор базовых контрольных точек кривой определенной степени. В описанном выше алгоритме используется интерполяционная разновидность NURBS-кривых и поверхностей, поскольку форма, которую должна принять линия, известна, а данный тип кривых и поверхностей обеспечивает отсутствие погрешности построения от заданной геометрии. Используемая для моделирования кривых и поверхностей библиотека *Verb Nurbs* [14] представляет собой базовый класс NURBS-геометрии.

Пользовательский интерфейс программы является дружелюбным и наглядным. Основные функции, которые могут быть активированы интерфейсом, полностью соответствуют шагам алгоритма, описанного выше, от загрузки с диска исходных

Таблица 1

№	Модель	Изображение	Время построения
1	Разъездной катер проекта 371 (12,5 м)		24 сек
2	Рыболовное судно вп 27 (18 м)		38 сек
3	Рыболовное судно вп 10 (22 м)		36 сек
4	Моторная яхта «Дон-20» (22 м)		30 сек
5	Речной сухогруз (96 м)		27 сек

данных до выгрузки информации о сформированной поверхности (рис. 9).

С помощью разработанного программного продукта было выполнено моделирование поверхностей судов нескольких проектов различного типа (табл. 1). Как показали результаты моделирования, была достигнута высокая точность полученных поверхностей, отклонение от облака точек нигде не превышало 0,001 от полуширины корпуса при сохранении гладкости поверхности до вторых производных. Кроме того, трудоемкость построения поверхностей снижена до 40 раз по сравнению с традиционными технологиями построения судовых поверхностей с помощью известных систем моделирования. Моделирование выполнено на процессоре Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU @.

Выводы и заключения. Общее время построения поверхности корпуса судна варьируется в пределах 40 секунд. Время генерации корпуса увеличивает-

ся в зависимости от вида носовой оконечности, чем сложнее форма, тем дольше скорость обработки.

Использованная для моделирования кривых и поверхностей библиотека *Verb Nurbs* предоставляет широкий спектр функций сплайновой геометрии. Преимуществом ее является то, что она реализована на нескольких языках программирования высокого уровня, включая C#, Python, JavaScript, Java. Это позволяет внедрять описанный алгоритм в другие системы моделирования поверхностей судового корпуса.

Разработанный макет программы предназначен для решения задачи создания и отображения трехмерных моделей судовых поверхностей в стандартном интернет-браузере. Программа существенно повышает производительность труда конструктора.

В настоящей статье описан алгоритм построения непрерывной поверхности судового корпуса вплоть до кормового транца. Алгоритм позволяет обеспе-

чить максимально близкое прилегание поверхности к заданному массиву точек по всей площади корпуса, в том числе в зонах интенсивного изменения геометрии.

Дальнейшее совершенствование алгоритма предполагает автоматизацию построения непрерывной поверхности корпуса по всей его длине.

Библиографический список

1. Доросинский Л., Зверева О. CALS технологии. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 277 с. ISBN 978-3-659-67118-0.
2. Аведьян А. PLM 2.0 в судостроении. URL: <https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2010/3/plm-20-v-sudostroenii.html> (дата обращения: 02.05.2021).
3. Ковшов А. Н., Назаров Ю. Ф., Ибрагимов И. М. [и др.]. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения: принципы, системы и технологии CALS/ИПИ. Москва: Издат. центр Академия, 2007. 304 с.
4. Сулов А. Н., Одегова О. В. Внедрение CALS-технологий в судостроении. URL: http://old.cals.ru/conferences/archive/CALS/cals_2001/tez/spgmtu.pdf (дата обращения: 02.05.2021).
5. Войткунский Я. И., Фаддеев М. И., Федяевский К. К. Гидромеханика. 2 изд. Ленинград: Судостроение, 1982. 472 с.
6. Гажиев А. В., Кошкада Н. В. Судостроительное черчение. Ленинград: Судостроение, 1979. 184 с.
7. Алексанов А. Некоторые факты о моделировании судовой поверхности, о которых вам не расскажут. URL: <https://ru.shmexpert.com/feed/archive/2022/11> (дата обращения: 20.01.2023).
8. Косников Ю. Н. Развитие теории геометрического моделирования пространственных форм и совершенствование графических систем реального времени: дис. д-ра техн. наук. Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. 373 с.
9. Shorkina I., Novikov S. Development of the skin of the surface of the tunnel part of the ship's hull // CEUR Workshop Proceedings. 31. Сер. «GraphiCon 2021 — Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision». 2021. С. 1098—1103.
10. Popov E. V., Rotkov S. I. The retrieval of NURBS-surface by genetic algorithm on the basis of point cloud // 21st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG) Communication Papers Proceedings. Plzen, Czech, June, 2013.
11. Попов Е. В., Шоркина И. Н. Автоматическое построение NURBS поверхности корпуса корабля // GraphiCon

2022: тр. 32-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Рязань, 19—22 сент. 2022 г.). Москва: Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 2022. С. 162—169. DOI: 10.20948/graphicon-2022-162-169.

12. Система трехмерного моделирования K3. URL: <http://www.k3info.ru/> (дата обращения: 30.04.2023).

13. Хавербеке М. Выразительный JavaScript. Современное веб-программирование. Санкт-Петербург: Питер, 2022. 480 с.

14. Verb библиотека. URL: <http://verbnurbs.com/docs/> (дата обращения: 25.04.2023).

ПОПОВ Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная геометрия, компьютерная графика и автоматизированное проектирование» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ), г. Нижний Новгород. SPIN-код: 8156-5998
AuthorID (РИНЦ): 663542
ORCID: 0000-0002-3058-2369
AuthorID (SCOPUS): 56585437200
ResearcherID: F-6001-2013
Адрес для переписки: porov_eugene@list.ru

ШОРКИНА Ирина Николаевна, аспирант кафедры «Инженерная геометрия, компьютерная графика и автоматизированное проектирование» ННГАСУ, г. Нижний Новгород; доцент кафедры «Теория конструирования инженерных сооружений» Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород. SPIN-код: 2754-3332
AuthorID: 826342
ORCID: 0000-0002-0960-1801
ResearcherID: IAO-8863-2023
Адрес для переписки: irenika77@gmail.com

Для цитирования

Попов Е. В., Шоркина И. Н. Автоматизация моделирования поверхности судовой корпуса // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 13—21. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-13-21.

Статья поступила в редакцию 25.05.2023 г.

© Е. В. Попов, И. Н. Шоркина



¹ Nizhegorodsky State
Architectural and Civil
Engineering University,
Nizhny Novgorod, Russia

² Volga State University
of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia

AUTOMATION OF SHIP HULL SURFACE SIMULATION

The article presents a modified algorithm for automated formation of geometric model of ship hull surface. The use of developed algorithm for construction of NURBS-surfaces allows to decrease labor input in several times in comparison with the use of manual labor when modeling surfaces in standard shipbuilding modeling systems like Sea Solution, Rhino and others. On the basis of this algorithm a software application is created, implemented in HTML5, JavaScript. The application allows to solve problems of creating and displaying three-dimensional models of ship surfaces in a standard the Internet browser. The program allows you to quickly analyze variants of the geometry of the ship hull model by adjusting the initial data, which significantly increases the productivity of the designer. It is possible to export the formed NURBS-surface for use in other design systems, including ship hull construction modeling, stability calculations, hull shell cutting and other tasks.

Keywords: NURBS curve, NURBS-surface, hull surface, geometric model, programming languages: JavaScript, HTML5.

References

1. Dorosinskiy L., Zvereva O. CALS tekhnologii [CALS technologies]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 277 p. ISBN 978-3-659-67118-0. (In Russ.).
2. Aved'yan A. PLM 2.0 v sudostroyenii [PLM 2.0 in shipbuilding]. URL: <https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2010/3/plm-20-v-sudostroenii.html> (accessed: 02.05.2021). (In Russ.).
3. Kovshov A. N., Nazarov Yu. F., Ibragimov I. M. [et al.]. Informatsionnaya podderzhka zhiznennogo tsikla izdeliy mashinostroyeniya: printsipy, sistemy i tekhnologii CALS/IPI [Information support for the life cycle of engineering products: principles, systems and technologies of CALS/IPI]. Moscow, 2007. 304 p. (In Russ.).
4. Suslov A. N., Odegova O. V. Vnedreniye CALS-tekhnologii v sudostroyenii. [Implementation of CALS-technologies in shipbuilding]. URL: http://old.cals.ru/conferences/archive/CALS/cals_2001/tez/spgmtu.pdf (accessed: on 02.05.2021). (In Russ.).
5. Voytkunskiy Ya. I., Faddeyev M. I., Fedyayevskiy K. K. Gidromekhanika. [Hydromechanics]. Leningrad, 1982. 472 p. (In Russ.).
6. Gazhiyev A. V., Koshkalda N. V. Sudostroitel'noye chercheniye. [Shipbuilding drafting]. Leningrad, 1979. 184 p. (In Russ.).
7. Aleksanov A. Nekotoryye fakty o modelirovanii sudovoy poverkhnosti, o kotorykh vam ne rasskazhut [Some facts about ship surface modeling that you won't be told]. URL: <https://ru.shmexpert.com/feed/archive/2022/11> (accessed: 20.01.2023). (In Russ.).
8. Kosnikov Yu. N. Razvitiye teorii geometricheskogo modelirovaniya prostranstvennykh form i sovershenstvovaniye graficheskikh sistem real'nogo vremeni [Development of the theory of geometric modeling of spatial shapes and improvement of real-time graphic systems]. Penza, 2006. 373 p. (In Russ.).
9. Shorkina I., Novikov S. Development of the skin of the surface of the tunnel part of the ship's hull // CEUR Workshop Proceedings. 31. Ser. «GraphiCon 2021 – Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision». 2021. P. 1098 – 1103. (In Engl.).
10. Popov E. V., Rotkov S. I. The retrieval of NURBS-surface by genetic algorithm on the basis of point cloud // 21st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG) Communication Papers Proceedings. Plzen, Czech, June, 2013. (In Engl.).
11. Popov E. V., Shorkina I. N. Avtomaticheskoye postroyeniye NURBS poverkhnosti korpusa korablya [Automatic construction of the NURBS surface of the ship's hull] // GraphiCon 2022. Moscow, 2022. P. 162 – 169. DOI: 10.20948/graphicon-2022-162-169. (In Russ.).
12. Sistema trekhmernogo modelirovaniya K3 [Three-dimensional modeling system K3]. URL: <http://www.k3info.ru/> (accessed: 30.04.2023). (In Russ.).
13. Khaverbeke Mareyn. Vyzritel'nyy JavaScript. Sovremennoye veb-programirovaniye [Expressive JavaScript. Modern Web Programming]. Saint Petersburg, 2022. 480 p. (In Russ.).
14. Verb biblioteka [Verb library]. URL: <http://verbnurbs.com/docs/> (accessed: 25.04.2023). (In Russ.).

POPOV Evgeniy Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Engineering Geometry, Computer Graphics and Computer-Aided Design Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), Nizhny Novgorod.
SPIN-code: 8156-5998
AuthorID (RSCI): 663542

ORCID: 0000-0002-3058-2369
AuthorID (SCOPUS): 56585437200
ResearcherID: F-6001-2013

Correspondence address: popov_eugene@list.ru

SHORKINA Irina Nikolayevna, Graduate Student of Engineering Geometry, Computer Graphics and Computer-Aided Design Department, NNGASU, Nizhny Novgorod; Associate Professor of Engineering Structures Design Theory Department, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 2754-3332

AuthorID (RSCI): 826342

ORCID: 0000-0002-0960-1801

ResearcherID: IAO-8863-2023

Correspondence address: irenika77@gmail.com

For citations

Popov E. V., Shorkina I. N. Automation of ship hull surface simulation // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 13–21. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-13-21.

Received May 25, 2023.

© E. V. Popov, I. N. Shorkina



ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО КОПАНИЮ ПРИЯМКОВ ТРАНШЕИ ПРИ РЕМОНТЕ ТРУБОПРОВОДА

При выполнении работ по ремонту трубопровода основной машиной, предназначенной для копания приямков траншеи, является одноковшовый экскаватор. В настоящее время при выполнении копания приямков используется два экскаватора, которые движутся вдоль трубопровода по параллельным направлениям. В целях повышения эффективности копания приямков необходимо проверить, возможно ли осуществлять копание приямков при помощи лишь одного экскаватора, расположенного по середине трубопровода, а также осуществлять отсыпание грунта в отвал, расположенный с обеих сторон от линии движения экскаватора. Рассмотрены случаи, когда копание приямков выполняется не модернизированным одноковшовым экскаватором, экскаватором с возможностью поворота секции стрелы и экскаватором с возможностью поворота ковша. Также рассмотрен полный цикл процесса откапывания приямка с отсыпанием грунта в отвал. На основе проведенных исследований разработан алгоритм автоматизированного управления движением ковша экскаватора при копании приямков траншеи. Приведены результаты компьютерного моделирования движения манипулятора экскаватора при выполнении копания приямков траншеи.

Ключевые слова: синтез движения, механизм манипулятора экскаватора, геометрическое моделирование, ремонт трубопровода, компьютерное моделирование движений, выходное звено.

Введение. Копание приямков траншеи экскаватором является одним из этапов выполнения работ по ремонту трубопроводов. Экскаватор позволяет выполнить выемку грунта над верхней частью трубопровода и с обеих сторон, образуя приямки траншеи. Технологическая схема ремонта трубопроводов также предусматривает применение двух положений машины для копания приямков [1–7]. Особенность их расположения в том, что центральная часть каждого экскаватора расположена над соответствующим приямком слева, либо справа от трубопровода. При этом грунт, извлекаемый из приямка, удаляется в ближайший к экскаватору отвал в пределах ремонтной полосы. Недостатком такого способа является создание нагрузки на ремонтируемый участок трубопровода в связи со спецификой расположения экскаватора. В данном способе одна из гусениц экскаватора располагается непосредственно над трубопроводом, что может спровоцировать его деформацию.

В связи с вышеизложенным, актуальной является задача модернизации процесса ремонта трубопровода. Гипотеза состоит в том, что для выполнения операций по копанию боковых приямков траншеи можно использовать только одно положение экскаватора, обеспеченного автоматизированной системой управления и наличием дополнительной степени подвижности механизма [8, 9]. Экскаватор при

этом располагается по середине трубопровода, с целью предотвращения силового воздействия на трубопровод. Для реализации данного подхода ремонта трубопровода необходима разработка автоматизированной системы управления движением ковша экскаватора по заданным безопасным траекториям и наличие пяти степеней подвижности механизма.

Постановка задачи исследования. Рассмотрим вначале технологическую схему ремонта трубопровода, в частности процесс копания боковых приямков траншеи при помощи двух различных положений экскаватора (рис. 1а). Как видно из рисунка, одна из гусениц каждого экскаватора расположена над трубопроводом. Чтобы не создавать нагрузку на трубопровод и использовать лишь одно положение экскаватора для копания обоих приямков, необходимо расположить его по середине трубопровода (рис. 1б). При этом направление движения экскаватора будет проходить по линии залегания трубопровода. Для проверки выдвинутой нами гипотезы необходимо проверить, возможно ли выполнение копания приямков траншеи с соблюдением требований к их геометрическим параметрам. Для этого необходимо выполнить геометрическое компьютерное моделирование процесса копания приямков траншеи на основе использования автоматизированной системы управления. При этом моделирование движения ковша необходимо осуществлять

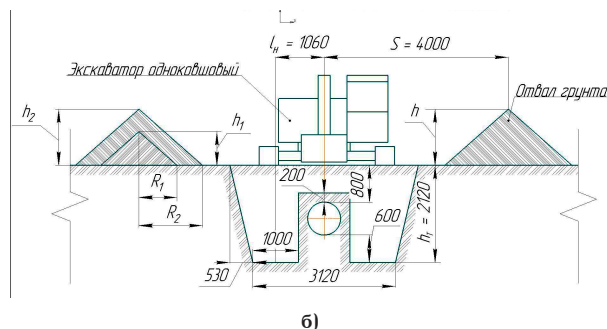
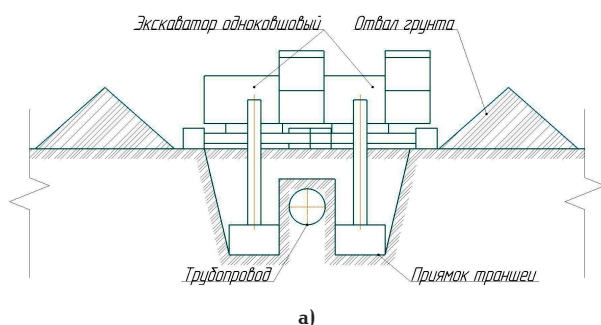


Рис. 1. Положение экскаватора относительно трубопровода
а) при копании с использованием двух положений; б) при копании с использованием одного положения

по пространственным траекториям, обеспечивающим заданное удаление от поверхности трубопровода с использованием указанной автоматизированной системы управления.

Теория. Форма прямая траншеи определена с использованием нормативных документов по ремонту трубопроводов [10]. Расстояние от верхней образующей точки до поверхности ремонтируемой трубы, на которой установлен экскаватор, составляет 800 мм (рис. 1б). Слева и справа от трубопровода находится защитный слой грунта толщиной 200 мм. Расстояние от нижней точки трубопровода до нижней стенки прямая траншеи составляет 600 мм. Ширина прямая траншеи равна ширине ковша экскаватора — 1000 мм. Для предотвращения обрушения грунта боковые стенки траншеи должны иметь определенный угол наклона. Он зависит от характеристик грунта. Одним из самых распространенных типов грунта является супесь, при которой крутизна откосов составляет 1:0,25. В результате получим, что верхняя часть откоса находится на 530 мм дальше от трубопровода. Суммарная ширина траншеи по верхней её части составляет 4180 мм, а глубина — 2120 мм.

Для проведения исследований целесообразно использовать геометрическое компьютерное моделирование [11, 12]. В работе данное моделирование выполнено на основе использования программ, описанных на языке AutoLISP в системе САПР NanoCAD, что позволило осуществить визуализацию процесса копания боковых прямых траншей. Чтобы доказать возможность копания прямая заданной формы, соблюдаются следующие условия. Механизм манипулятора экскаватора имеет не четыре степени подвижности, как у большинства серийно выпускаемых машин, а пять. Варианты механизма манипулятора описаны в работах [8, 9]. При выполнении моделирования центр экскаватора расположен над осью трубопровода. Отвал грунта находится слева и справа от трубопровода на расстоянии 4000 мм. Заметим, что форма прямая симметрична относительно вертикальной оси трубопровода, поэтому при моделировании движения достаточно провести визуализацию копания прямая для одной из сторон. При разработке автоматизированной системы управления необходимо решать задачу сокращения времени, необходимого для копания прямая траншеи. Указанное время в значительной степени зависит от суммарного объема движения в кинематических парах и гидроцилиндрах [11, 13]. С целью сокращения объема движения существует необходимость задавать конечную точку траектории движения ковша при отсыпании грунта в отвал на различных высо-

тах. Указанная высота будет зависеть от количества отсыпанных ковшей с грунтом. Определим связанный с этим график функции:

$$h_1 = f(k), \quad (1)$$

где h_1 — определяет высоту отвала (рис. 1б), k — количество ковшей со средним заданным объемом V_k грунта. Значение параметра V_k определяется на основе проведенных натуральных испытаний. В связи с тем, что в процессе копания прямая траншеи необходимо формировать боковые откосы, значение параметра V_k будет равно половине расчетного объема используемого ковша. Увеличение высоты отвала для случая, когда отвал имеет форму конуса вращения, определяется по зависимости:

$$\frac{1}{3} \pi R_2^2 h_2 = V_k + \frac{1}{3} \pi R_1^2 h_1, \quad (2)$$

где R_1 , R_2 , h_1 , h_2 — радиусы и высоты конусов отвалов для начального момента времени при отсыпании одного ковша и после отсыпания второго ковша (рис. 1б).

Отсюда получим новую высоту конуса при отсыпании k ковшей:

$$h_2 = \frac{\pi R_1^2 h_1 + 3kV_k}{\pi R_2^2}. \quad (3)$$

Соотношение радиуса конуса к его высоте в рассматриваемом случае имеет следующий вид:

$$R = h/0,779. \quad (4)$$

Учитывая соотношение (4), зависимость (3) принимает вид:

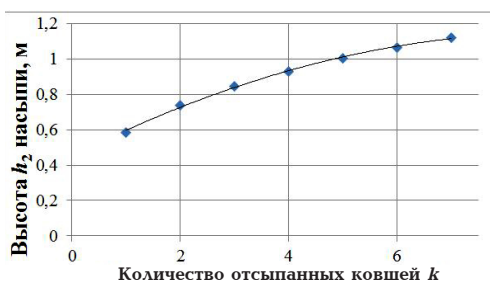
$$h_2 = \sqrt[3]{\frac{R_1^2 h_1 + 0,955kV_k}{1,65}}. \quad (5)$$

На основе проведенных расчетов получены аналитические зависимости параметров h_2 и h_3 и графики $h_2 = f_1(k)$ и $h_3 = f_2(k)$, представленные на рис. 2а,б.

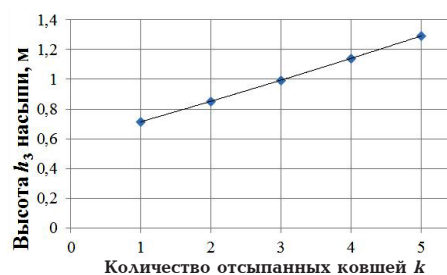
$$h_2 = -0,04(k \cdot V_k)^2 + 0,361(k \cdot V_k) + 0,449, \quad (6)$$

$$h_3 = -0,021(k \cdot V_k)^2 + 0,264(k \cdot V_k) + 0,529, \quad (7)$$

где h_3 — высота насыпи, полученная с учетом положения соседнего конуса (рис. 3). Зависимость (7) установлена на основе определения объема, полученного пересечением двух конусов (рис. 3).



а)



б)

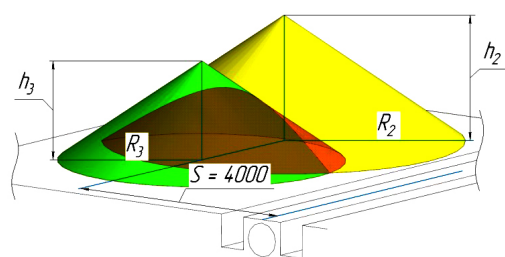
Рис. 2. Графики зависимостей: а) $h_2 = f_1(k)$; б) $h_3 = f_2(k)$ 

Рис. 3. Радиусы и высоты конусов отвалов

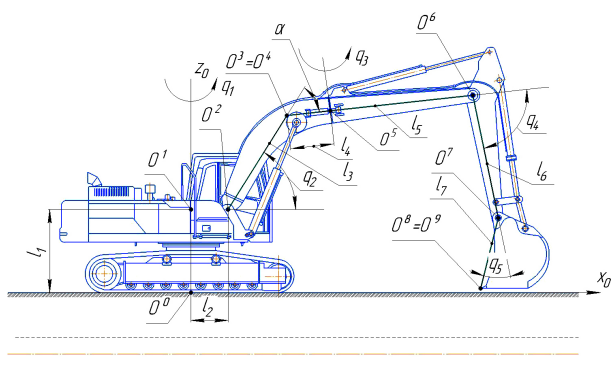


Рис. 4. Положение систем координат, связанных со звеньями шестизвенного механизма экскаватора M12-3-2-8-12-1-3-3-12

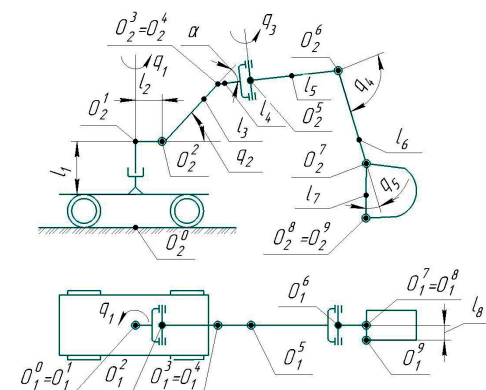


Рис. 5. Кинематическая схема механизма манипулятора экскаватора M12-3-2-8-12-1-3-3-12

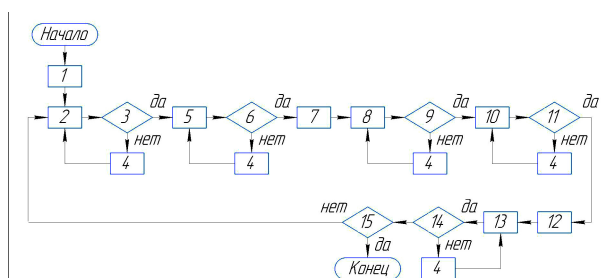


Рис. 6. Схема алгоритма автоматизированного управления движением ковша экскаватора при копании приямков траншеи

Зададим положение систем координат, связанных с подвижными звеньями механизма манипулятора экскаватора и основных геометрических параметров, определяющих этот шестизвенный механизм. Заметим, что с некоторыми подвижными звеньями могут быть заданы две или три системы координат. Манипулятор экскаватора представим в виде шестизвенного пространственного механизма с дополнительной кинематической парой (рис. 4) [9]. Также исследуем механизм манипулятора экскаватора с пятью кинематическими парами с обеспечением поворота ковша [8]. На рис. 4 точки $O^0, O^1, \dots$ и O^9 определяют начала систем координат и опорные точки звеньев механизма. Проекция данных точек на рис. 5 обозначены следующим образом: $O^0 \rightarrow O^{10}, O^{20}$; $O^1 \rightarrow O^{11}, O^{21}$ и т.п. Параметры $l_1, l_2, \dots$ и l_8 задают размеры звеньев механизма; $q_1, q_2, \dots$ и q_5 — обобщенные координаты. Удаление экскаватора до точки центра отвала грунта обозначено параметром S (рис. 3). Высоту опускания рабочего оборудования обозначим параметром h_r (рис. 16). Расстояние от точки крепления рабочего органа (ковша экскаватора) до середины трубопро-

вода определяется параметром l_n (рис. 16). На рис. 5 представлена кинематическая схема шестизвенного механизма манипулятора экскаватора. Модели кинематической цепи обычного экскаватора M12-3-2-2-11 и экскаваторов, обеспеченных пятой кинематической парой M12-3-2-8-12-1-3-3-12 (рис. 5) и M12-3-2-2-3-11, заданы геометрическими параметрами, представленными в табл. 1–3. Если ковш располагается с левой стороны от трубопровода, то расстояние от ковша до трубопровода определяется положением точки O^9 (рис. 5, 76). Поэтому данная точка принимается за центр выходного звена, движение которой моделируется с помощью синтеза движений по вектору скоростей [11]. Обозначение механизмов принято в соответствии с методикой, представленной в работе [11]. В таблице параметры $l_1, l_2, \dots$ и l_8 задают соответственно длины отрезков $O^0O^1, O^1O^2, \dots$ и O^8O^9 ; l_{smi} — смещения вдоль осей координат или углы поворота при значениях параметра $n_{kod} = 7 \dots 9$ или $n_{kod} = 10 \dots 12$; n_{kod} — коды кинематических преобразователей [11–14].

Результаты экспериментов. Схема алгоритма автоматизированного управления движением ков-

Задание модели кинематической цепи механизма М12-3-2-2-11

Система координат	O^1	O^2	O^3	O^4	O^5	O^6
q_i	0	q_1	q_2	q_3	q_4	0
l_i , (см)	0	$l_2 = 81$	$l_3 = 600$	$l_4 = 281$	$l_5 = 161$	0
l_{smi} , (см)	$l_1 = 185$	0	0	0	0	$l_5 = 50$
n_{kod}	12	3	2	2	2	11

Таблица 2

Задание модели кинематической цепи механизма М12-3-2-8-12-1-3-3-12

Система координат	O^1	O^2	O^3	O^4	O^5	O^6	O^7	O^8	O^9
q_i	0	q_1	q_2	0	0	q_3	q_4	q_5	0
l_i , (см)	0	$l_2 = 81$	$l_3 = 246$	0	0	$l_5 = 318$	$l_6 = 281$	$l_7 = 161$	0
l_{smi} , (см)	$l_1 = 185$	0	0	$\alpha = 51^\circ$	$l_4 = 97$	0	0	0	$l_8 = 50$
n_{kod}	12	3	2	8	12	1	3	3	12

Таблица 3

Задание модели кинематической цепи механизма М12-3-2-2-3-11

Система координат	O^1	O^2	O^3	O^4	O^5	O^6	O^7
q_i	0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	0
l_i , (см)	0	$l_2 = 81$	$l_3 = 246$	$l_4 = 281$	$l_5 = 161$	$l_6 = 0$	0
l_{smi} , (см)	$l_1 = 185$	0	0	0	0	0	$l_7 = 50$
n_{kod}	12	3	2	2	2	3	11

ша представлена на рис. 6. На рис. 6 приняты следующие обозначения: 1 — задание переменных $k = 0$, $k_{\max}$ ($k_{\max}$ — максимальное количество ковшей для формирования одного конуса отвала), $k_{\text{пр}} = 0$, $k_{\text{пр}}$ ($k_{\text{пр}}$ — максимальное количество горизонтальных проходов ковша вдоль траншеи), $k_{\text{пр}}^{\max} = h_{\text{T}}/h_{\text{CA}}$ (h_{CA} — высота срезания слоя грунта ковшем за один проход); 2 — синтез малых движений (СМД) [11] до конечной точки A^{t+10} траектории (КТТ) f_1 (рис. 7а); 3 — КТТ $f_1 A^{t+10}$ достигнута; 4 — расчет Δq_i , $q_i = q_i + \Delta q_i$; 5 — СМД до КТТ $f_2 A^{t+20}$ (движение на подъем ковша) (рис. 7г); 6 — КТТ $f_2 A^{t+20}$ достигнута; 7 — вычисление КТТ $f_3 A^{t+40}$ (5,7) (рис. 7г); 8 — СМД до КТТ $f_3 A^{t+40}$ (движение ковша в направлении вершины конуса отвала); 9 — КТТ $f_3 A^{t+40}$ достигнута; 10 — СМД до КТТ $f_4 A^{t+70}$ (рис. 7г); 11 — КТТ $f_4 A^{t+70}$ достигнута; 12 — вычисление КТТ $f_5 A^{t+80}$, $h_{\text{T}} = h_{\text{T}} + h_{\text{CA}} \cdot k$; 13 — СМД до КТТ $f_5 A^{t+80}$ (рис. 7г); 14 — КТТ $f_5 A^{t+80}$ достигнута; 15 — $k_{\text{пр}} = k_{\text{пр}}^{\max}$.

Результаты пространственного моделирования движения рабочего органа экскаваторов, заданных в табл. 1, 2 и 3 представлены на рис. 7а, б, в, г. На рис. 7а обозначены параметры l_1^{T} , l_2^{T} траншеи и траектория f_1 , заданная отрезком $A'A^{t+10}$ движения центра выходного звена точки O^6 рабочего органа обычного экскаватора при копании прямка. На рис. 7б представлено моделирование движения экскаватора, изображенного на рис. 4. Моделирование движения экскаватора, оснащенного поворотным ковшом, представлено на рис. 7в. Синтез движения механизма экскаватора при отсыпании грунта в отвал представлен на рис. 7г. Синтез движения (рис 7б, в, г) обеспечивает соблюдение установленных

геометрических параметров, определяющих форму прямка. Анализ синтеза движений ковша на рис. 7а показывает, что режущая кромка в этом случае располагается не перпендикулярно направлению движения. Следовательно, обычный экскаватор при его положении по середине трубопровода не может выполнять работу по копанию прямков траншеи. Манипуляторы экскаватора, имеющие пять степеней подвижностей, напротив, позволяют выполнить указанную выше работу (рис. 7б, в). Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность выдвинутой гипотезы возможности копания прямков траншеи, когда экскаватор перемещается по середине линии залегания трубопровода и обеспечен подвижностью кинематической цепи, равной пяти.

Основные результаты и выводы. Проведенные исследования могут быть использованы при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке автоматизированной системы управления движением рабочего оборудования экскаватора.

Библиографический список

- Аладинский В. В., Малков А. Г., Ушаков А. В. Метод ремонта газопроводов с использованием труб, бывших в эксплуатации // Территория Нефтегаз. 2009. № 8. С. 56–60.
- Булавинцева А. Д., Мазуркин П. М. Динамика аварий по причиненному ущербу на линейной части магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть» // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 4. С. 64–67.
- Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects //

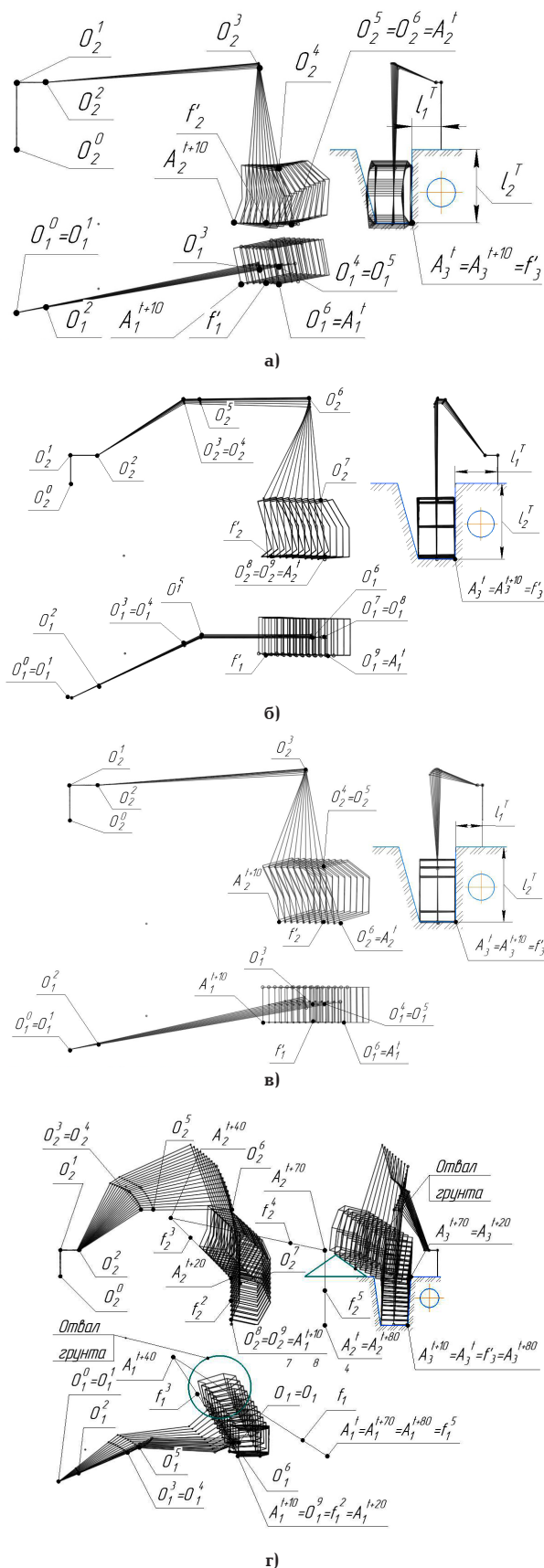


Рис. 7. Результаты пространственного моделирования движения рабочего органа экскаватора:
а) не модернизированный экскаватор M12-3-2-2-2-11;
б) экскаватор с возможностью поворота секций стрелы M12-3-2-8-12-1-3-3-12;
в) экскаватор с возможностью поворота ковша M12-3-2-2-2-3-11;
г) при отсыпке грунта экскаватором M12-3-2-8-12-1-3-3-12

Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. 2016. P. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2.

4. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Анализ устройств предотвращения повреждения стенки трубопровода // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов II Нац. науч.-практ. конф., Омск, 18–19 апреля 2019 года. Омск: Изд-во СибАДИ, 2019. С. 7–9.

5. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ. 2020. № 17 (1). С. 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21.

6. Аникин Е. А. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. Москва: ИРЦ Газпром, 2001. 108 с.

7. Кузнецов И. С. К вопросу автоматизации расчета магистрального нефтепровода // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., Омск, 08–09 февраля 2018 года. Омск: Изд-во СибАДИ, 2018. С. 19–24.

8. Сидоров Е. А., Ткачищак Д. В. Анализ конструктивных схем одноковшовых строительных экскаваторов // Избранные докл. 64-й Унив. науч.-техн. конф., Томск, 24 апреля 2018 года. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2018. С. 338–343.

9. Пат. 116519 Российская Федерация, МПК Е 02 F 3/28. Рабочее оборудование экскаватора / Демиденко А. И., Билялов А. М. № 2011130480/03; заявл. 21.07.11; опубл. 27.05.12. Бюл. № 15. 12 с.

10. РД 39-00147105-015-98. Правила капитального ремонта магистральных нефтепроводов. Уфа: ИПТЭР. 1998. 194 с.

11. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.

12. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. 1972. № 94 (4). P. 303–309.

13. Притыкин Ф. Н. Исследование кинематических параметров андроидного робота при автоматизированном синтезе движений по вектору скоростей // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9.

14. Притыкин Ф. Н. Моделирование гиперповерхностей, отражающих взаимосвязь кинематических параметров механизма андроидного робота // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 7 (217). С. 21–29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029.

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

SPIN-код: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Илья Сергеевич, аспирант кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6890-3069

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Адрес для переписки: mprogamer111@gmail.com

Для цитирования

Притыкин Ф. Н., Кузнецов И. С. Геометрическое моделирование процесса выполнения работ по копанью прямых траншей при ремонте трубопровода // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-22-28.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023 г.

© Ф. Н. Притыкин, И. С. Кузнецов

GEOMETRIC MODELING OF THE PROCESS OF DIGGING TRENCH PITS DURING PIPELINE REPAIR

When performing work on the repair of the pipeline, the main machine designed for digging trench pits is a single-bucket excavator. Pit digging currently uses two excavators moving along the pipeline in parallel directions. In order to increase the efficiency of digging pits, it is necessary to check whether it is possible to dig pits with only one excavator located in the middle of the pipeline, as well as to dump soil into a dump located on both sides of the excavator's line of motion. Cases are considered when pit digging is performed by a non-modernized single-bucket excavator, an excavator with the ability to rotate the boom section and an excavator with the ability to rotate the bucket. The full cycle of the process of digging a pit with dumping of soil into a dump is also considered. On the basis of the research carried out, an algorithm for automated control of the movement of the excavator bucket when digging trench pits is developed. The results of computer simulation of the movement of the excavator manipulator when digging trench pits are presented.

Keywords: movement synthesis, excavator arm mechanism, geometric modeling, pipeline repair, computer simulation of movements, output link.

References

1. Aladinskiy V. V., Malkov A. G., Ushakov A. B. Metod remonta gazoprovodov s ispol'zovaniyem trub, byvshikh v ekspluatatsii [Method for repairing gas pipelines using second-hand pipes] // *Territoriya Neftegaz. Neftegaz Territory*. 2009. No. 8. P. 56–60. (In Russ.).
2. Bulavintseva A. D., Mazurkin P. M. Dinamika avariyy po prichinennomu ushcherbu na lineynoy chasti magistral'nykh nefteprovodov OAO AK «Transneft» [Dynamics of accidents caused by damage on the linear part of Transneft's main oil pipelines] // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Modern Knowledge-Intensive Technologies*. 2011. No. 4. P. 64–67. (In Russ.).
3. Timashev S., Bushinskaya A. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016. P. 9–43. DOI: 10.1007/978-3-319-25307-7-2. (In Engl.).
4. Demidenko A. I., Kuznetsov I. S. Analysis of pipeline wall damage prevention devices [Analiz ustroystv predotvrashcheniya povrezhdeniya stenki truboprovoda] // *Obrazovaniye. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. Education. Transport. Innovation. Construction*. Omsk, 2019. P. 7–9. (In Russ.).
5. Demidenko A. I., Kuznetsov I. S. Sovershenstvovaniye konstruktssii rabochego oborudovaniya gidravlicheskogo ekskavatora [Improvement of the hydraulic excavator's working equipment] // *Vestnik SibADI. The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020. Vol. 17 (1). P. 12–21. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21. (In Russ.).
6. Anikin E. A. Effektivnyye metody remonta magistral'nykh truboprovodov [Effective repair methods for trunk pipelines]. Moscow, 2001. 108 p. (In Russ.).
7. Kuznetsov I. S. K voprosu avtomatizatsii rascheta magistral'nogo nefteprovoda [On the issue of automating the calculation of the main oil pipeline] // *Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya molodykh uchenykh. Fundamental and Applied Research by Young Scientists*. 2018. P. 19–24. (In Russ.).
8. Sidorov E. A., Tkakishchak D. V. Analiz konstruktivnykh skhem odnokovshovykh stroitel'nykh ekskavatorov [Analysis of design schemes of single-bucket construction excavators] // *Izbrannyye dokl. 64-y Univ. nauch.-tekhn. konf. Selected Papers of the 64th University Scientific and Technical Conference*. 2018. P. 338–343. (In Russ.).
9. Patent 116519 Russian Federation, IPC E 02 F 3/28. Rabocheye oborudovaniye ekskavatora Rabocheye oborudovaniye ekskavatora [Working equipment of the excavator] / Demidenko A. I., Bilyalov A. M. No. 116519. (In Russ.).
10. State Standard 39-00147105-015-98. Pravila kapital'nogo remonta magistral'nykh nefteprovodov [Rules for the overhaul of main oil pipelines]. Ufa, 1998. 194 p. (In Russ.).
11. Pritykin F. N. Virtual'noye modelirovaniye dvizheniy robotov, imeyushchikh razlichnuyu strukturu kinematischeskikh tsepey [Virtual simulation of robot movements with different kinematic chain structures]. Omsk, 2014. 172 p. (In Russ.).
12. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1972. No. 94 (4). P. 303–309. DOI: 10.1115/1.3426611. (In Engl.).
13. Pritykin F. N. Issledovaniye kinematischeskikh parametrov androjdnogo robota pri avtomatizirovannom sinteze dvizheniy po vektoru skorostey [Study of kinematic parameters of android robot in automated synthesis of motions on velocity vector] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2022. No. 2 (182). P. 5–9. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-5-9. (In Russ.).
14. Pritykin F. N. Modelirovaniye giperpoverkhnostey, otrazhayushchikh vzaimosvyaz' kinematischeskikh parametrov mekhanizma androjdnogo robota [Simulation of hypersurfaces based on the database of kinematic parameters of the android

robot mechanism] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy. *Herald of Computer and Information Technologies*. 2022. Vol. 19, no. 7 (217). P. 21 – 29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029. (In Russ.).

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

SPIN-code: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Correspondence address: pritykin@mail.ru

KUZNETSOV Ilya Sergeyevich, Graduate Student of Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6890-3069

ORCID: 0000-0002-6524-4976

Correspondence address: mrprogamer111@gmail.com

For citations

Pritykin F. N., Kuznetsov I. S. Geometric modeling of the process of digging trench pits during pipeline repair // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-22-28.

Received May 10, 2023.

© F. N. Pritykin, I. S. Kuznetsov

ПРОБЛЕМА СОКРАЩЕНИЯ КАФЕДР ГЕОМЕТРО-ГРАФИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ В УНИВЕРСИТЕТАХ РОССИИ

В статье авторы подняли проблему сокращения в университетах России кафедр геометро-графической подготовки, которое за последние 16 лет составило около 1/3. Рассмотрены причины сложившейся ситуации, среди которых следует выделить нехватку высококвалифицированных кадров высшей квалификации, способных возглавить научные школы по профилю кафедр геометро-графической подготовки. Необходимо активизировать работу кафедр геометро-графической подготовки по подготовке научно-педагогических кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре. Предлагается закрепить на уровне государственного стандарта для инженерных специальностей необходимую трудоемкость и более жесткие требования к кадровым условиям реализации основной профессиональной образовательной программы в отношении дисциплин геометро-графической подготовки студентов.

Ключевые слова: проблема, кафедра, геометро-графическая подготовка, университет, подготовка кадров.

Введение. Проводимая в Российской Федерации промышленная политика импортозамещения в виде программ: «Национальная технологическая инициатива» [1], «Цифровая трансформация» [2] и т.п., а также цифровизация процесса проектирования и производства, в частности CALS и BIM концепции, выдвигают новые требования к подготовке специалистов, готовых к продуктивному решению комплексных инженерных задач, основанных не столько на реализации компетенций в своей предметной области, сколько на способности к междисциплинарной деятельности, опирающейся на понимание сущности информационных процессов, возникающих на всех этапах жизненного цикла изделий. Вне зависимости от результата деятельности любого технического предприятия итоговый продукт будет иметь некоторую геометрическую форму, определяющую конструктивные и технологические возможности объектов. Именно в рамках инженерной геометрии решаются позиционные и метрические задачи, которые обеспечивают подготовку графической части проектной документации любого производства на всех этапах жизненного цикла любого изделия. Наряду с этим для подготовки высококвалифицированных инженерных кадров в различных отраслях народного хозяйства России необходимо также на государственном

уровне изменение политики в области реализации цикла дисциплин геометро-графической подготовки (ГГП) будущих инженеров, которая абсолютно необходима вне зависимости от подхода к реализации процесса инженерного проектирования как с применением современных систем автоматизированного проектирования, так и без них. Например, в Сербии школьная программа, ориентированная на последующую подготовку высококвалифицированных инженерных кадров в местных университетах, предусматривает изучение дисциплины «Начертательная геометрия» в течение 4 лет (классов), что делает полученных специалистов востребованными на рынке труда в Западной Европе. Аналогично в Российской Федерации образовательным стандартом предусмотрено изучение начальных сведений по начертательной геометрии в 10–11 классах [3], но в значительно меньшем объеме.

Осознавая важность геометро-графической подготовки для новой генерации инженерного корпуса, Президент России утвердил перечень поручений по итогам заседания Президиума Государственного Совета Российской Федерации [4], среди которых содержится поручение Пр-1118ГС, п.2д: «Обеспечить начиная с 2024/25 учебного года освоение основ черчения лицами, обучающимися по образовательным программам основного общего образования,

Трансформация научной дисциплины в Номенклатуре научных специальностей ВАК РФ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.01.01 – ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОМЕТРИЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА является определяющей в группе 05 – ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ и инвариантна по отношению к отраслям – СТРОИТЕЛЬСТВО, АРХИТЕКТУРА, МАШИНОСТРОЕНИЕ, и др.



Рис. 1. Трансформация научной специальности 05.01.01 в Номенклатуре ВАК РФ

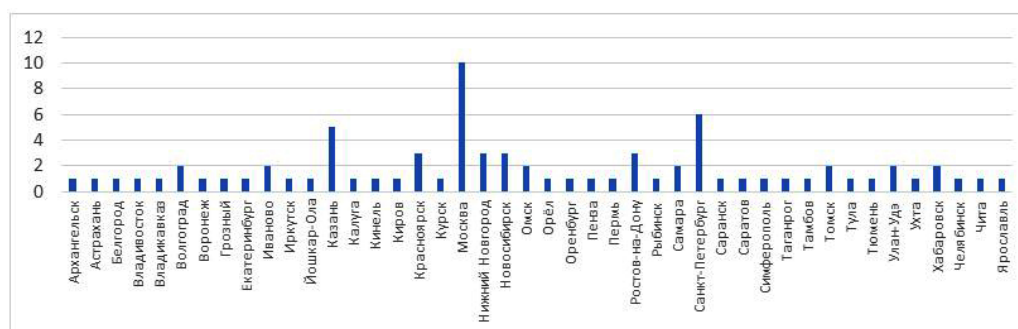


Рис. 2. География кафедр ГПП

а также изучение учебного курса «Черчение» на уровне среднего общего образования лицами, обучающимися по технологическому (инженерному) профилю».

Несомненно, подобные инициативы положительно скажутся на подготовке инженерного корпуса нового поколения и подобную государственную поддержку необходимо продолжить и реализовать не только для общего и среднего, но и для высшего образования, чтобы обеспечить дальнейшую преемственность и развитие у будущих инженеров всех необходимых компетенций.

Вместе с тем в последние годы наблюдается неуклонная тенденция к уменьшению в университетах России количества кафедр геометро-графической подготовки как самостоятельных структурных единиц, способных не только проводить учебные занятия, но и проводить научные исследования по профилю преподаваемых дисциплин, а также совершенствовать учебно-методическую литературу на высоком профессиональном уровне. Это приводит к значительному уменьшению профессионального потенциала кафедр ГПП, не позволяя на высоком уровне выполнять свои профессиональные обязанности, что наносит непоправимый вред национальным интересам Российской Федерации

в части подготовки новой генерации высококвалифицированных инженерных кадров.

Следует отметить, что ВАК РФ на протяжении всей своей деятельности отслеживает тенденции развития науки, техники, технологий и вносит соответствующие изменения в Номенклатуру научных специальностей. На рис. 1 показана трансформация научной специальности 05.01.01 «Инженерная геометрия и компьютерная графика» (в соответствии с Номенклатурой 2000 г.) с учетом изменений в технологиях проектирования.

Анализ текущего состояния кафедр геометро-графической подготовки на территории Российской Федерации. Для анализа текущего состояния кафедр геометро-графической подготовки была проанализирована информация с сайтов многих университетов Российской Федерации, из которых были выбраны технические вузы (в том числе архитектурно-строительные, технологические, путей сообщения, горные, морские и др.) в количестве 115 шт. В результате было установлено, что из 115 технических университетов кафедры, чьи наименования полностью или частично соответствуют содержанию ГПП, присутствуют только в 77, что составляет примерно 67 %. Их география по городам представлена на рис. 2.

Если сравнивать этот показатель с аналогичным за 2007 г., то получится, что за последние 16 лет произошло сокращение примерно на 1/3 числа кафедр геометро-графической подготовки. Особенно заметно исчезновение кафедр ГПП в крупных политехнических университетах страны. Например, в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (СПбПУ) за отсутствием профильной кафедры общеобразовательную подготовку студентов по курсу «Начертательная геометрия» для различных институтов машиностроительного и строительного профиля СПбПУ осуществляет «Высшая школа дизайна и архитектуры». Также отсутствует самостоятельная кафедра геометро-графической подготовки в Московском политехническом университете. В национальном исследовательском университете «МЭИ» была образована кафедра моделирования и проектирования энергетических установок посредством объединения кафедр инженерной графики и парогенераторостроения. В национальном исследовательском университете «Московский институт электронной техники» с 1 мая 2023 года на базе кафедры инженерной графики и дизайна создан Институт цифрового дизайна. Примеры можно продолжать...

Анализ полученной информации показывает, что можно выделить несколько траекторий развития кафедр ГПП:

1. Остались в виде самостоятельных структурных единиц.
2. Вошли в состав других кафедр или других структурных единиц.
3. Вошли в единую структуру общепрофильной подготовки.
4. Прекратили своё существование. Дисциплины ГПП ведут непрофильные кафедры.

Одной из причин уменьшения количества кафедр ГПП в университетах России является хищное поведение выпускающих кафедр при составлении и реализации учебных планов с целью сохранения, а иногда и увеличения, нагрузки на профильных выпускающих кафедрах. Косвенно этому способствует существующий Федеральный образовательный стандарт, который с каждой новой итерацией позволяет профильным кафедрам всё в большей степени ущемлять кафедры общепрофильной подготовки. На данный момент в соответствии с п. 4.4.3 ФГОС 3++ не менее 70 % численности педагогических работников Организации, участвующих в реализации программы, и лиц, привлекаемых Организацией к реализации программы на иных условиях, должны вести научную, учебно-методическую и (или) практическую работу, соответствующую профилю преподаваемой дисциплины (модуля). Учитывая такую «размытую» формулировку, выпускающие кафедры используют этот 30-процентный резерв, чтобы забирать учебную нагрузку у кафедр общепрофильной подготовки. И зачастую их жертвами становятся именно кафедры ГПП вплоть до полного их исчезновения.

Другой причиной сложившейся негативной ситуации является отсутствие прочной прослойки состоявшихся эффективных руководящих кадров, способных повести за собой коллектив кафедры в определённом научном направлении, что в результате естественного оттока советской профессорской геометро-графической школы при условии отсутствия сильного научного и учебно-методического потенциалов, приводит к их сокращению и исчезновению. Во многих работах (например, [5,

6]) отмечалось постепенное сокращение в университетах России количества докторов наук по научной специальности 2.5.1 (бывшая научная специальность 05.01.01), которая полностью соответствует профилю кафедр ГПП. Это была «мина» замедленного действия, о негативных последствиях которой неоднократно упоминалось ранее [5]. Дальнейшее развитие событий привело к тому, что кафедры геометро-графической подготовки начали терять свою самобытность и планомерно исчезать из структуры технических вузов. Кадровый голод именно докторов наук, как источника новых научно-педагогических кадров, привёл не только к сокращению кафедр геометро-графической подготовки, но и аспирантуры и докторантуры по научной специальности 2.5.1 в России, как источнику научно-педагогических кадров. На данный момент на территории России (без учёта новых территорий) действует девять аспирантур и две докторантуры. Следует учитывать, что открытие докторантуры возможно только в тех организациях, где имеется профильный диссертационный совет. На данный момент в России действует два диссертационных совета по научной специальности 2.5.1: 99.2.108.02 на базе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева» и 24.2.350.05 на базе ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет». Также на базе этих трех университетов действуют аспирантуры по научной специальности 2.5.1. Кроме них, перечень вузов, на базе которых действует аспирантура по 2.5.1, включает:

1. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).
2. Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».
3. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева.
4. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
5. Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления.
6. Донской государственный технический университет.

Следует отметить, что на данный момент имеет место случайный характер появления желающих поступить в аспирантуру по специальности 2.5.1, имеющих чрезвычайно низкий уровень знаний в области инженерной геометрии и компьютерной графики, что в значительной мере снижает эффективность аспирантуры как источника научно-педагогических кадров по геометро-графической подготовке. Кроме того, существующие аспирантуры действуют с разной эффективностью, что не позволяет покрыть потребность кафедр ГПП в высококвалифицированных научно-педагогических кадрах. А такая необходимость объективно существует. Если выполнить анализ кадрового потенциала кафедр геометро-графической подготовки требованиям к кадровым условиям реализации ОПОП ФГОС ВО 3++, в соответствии с которыми не менее 60 % численности педагогических работников Организации и лиц, привлекаемых к образовательной деятельности Организации на иных условиях, должны иметь ученую степень и (или) ученое звание, то на данный момент это требование выполняется лишь у 50 % кафедр. При этом следует отметить, что

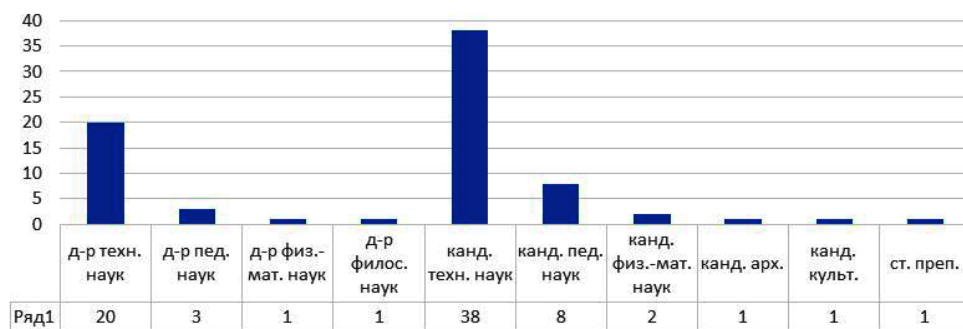


Рис. 3. Ранжирование заведующих кафедрами ГПП по учёным степеням

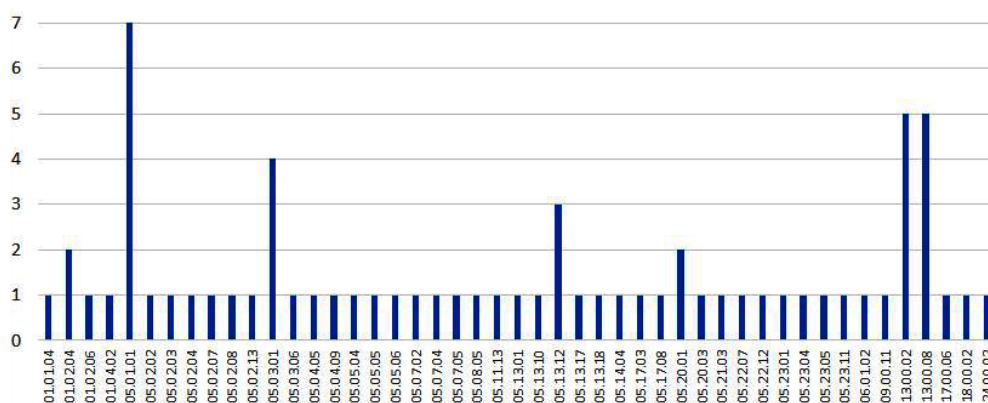


Рис. 4. Распределение заведующих кафедрами ГПП по научным специальностям

отметку в 60 % не удалось преодолеть ни одному из московских университетов! Также встречаются кафедры, на которых работают один-два сотрудника с учёной степенью, а остальные без нее. Наличие большого количества ассистентов, преподавателей и старших преподавателей, т.е. сотрудников кафедры без учёной степени и, соответственно, учёного звания, даёт дополнительный «козырь» выпускающим кафедрам, которые зачастую имеют более высокий кадровый потенциал, чтобы забрать дисциплины и, соответственно, учебную нагрузку или поглотить кафедру путём её объединения с другим коллективом. Здесь следует отметить, что многие идут по пути наименьшего сопротивления и проводят исследования с последующей защитой диссертации по педагогическим и другим наукам или по техническим наукам, но другим научным специальностям. Если такая тенденция будет преобладающей, то это тоже в перспективе грозит негативными последствиями. Поскольку обучение в аспирантуре с последующей сдачей кандидатского экзамена по научной специальности даёт более полное и качественное изучение специализированных разделов дисциплин, обеспечивающих научный инструментарий в исследованиях по профилю кафедры.

Возвращаясь к проблеме наличия учёных степеней среди профессорско-преподавательского состава, следует отметить, что уже имеется прецедент, при котором одну из кафедр геометро-графической подготовки возглавляет старший преподаватель без учёной степени. Будущее такой кафедры в качестве самостоятельной структурной единицы настораживает. Если анализировать руководящее звено 76 кафедр ГПП, то здесь преобладают кандидаты и доктора технических наук (рис. 3). Причём кандидатов наук почти вдвое больше, чем докторов.

Вместе с тем распределение учёных степеней среди заведующих кафедрами выглядит достаточно разнообразно. Имеется даже один доктор философских наук и один кандидат культурологии. Сложно предположить, что такие педагогические работники ведут научную, учебно-методическую и (или) практическую работу, соответствующую профилю преподаваемых геометро-графических дисциплин, как того требует ФГОС ВО 3+ +.

Анализ научных специальностей, по которым защищали диссертации заведующие кафедрами геометро-графической подготовки показывает, что из 68 кафедр (некоторые по разным причинам не удалось идентифицировать) только семь заведующих являются специалистами по научной специальности 05.01.01 (рис. 4) в соответствии с ранее действующей Номенклатурой научных специальностей, по которой получены дипломы кандидата и доктора технических наук.

Из этого напрашивается вывод о том, что зачастую кафедрами геометро-графической подготовки руководят непрофильные специалисты. Также настораживает большое разнообразие научных специальностей руководящего звена кафедр ГПП.

К сожалению, возникший комплекс проблем кафедр геометро-графической подготовки носит системный характер. Корни этих проблем уходят глубоко в советскую научную школу. Кроме того, ситуация усугублялась не зависящими от научных школ факторами. Так, многие из вышеперечисленных проблем были актуальными более 40 лет назад и неоднократно обсуждались на научно-методических семинарах самого высокого уровня. Например, в 1980 г. на семинаре в Ленинградском инженерно-строительном институте под руководством профессора Валькова К. И. была поднята проблема о том, что упразднение научной специальности 05.01.01

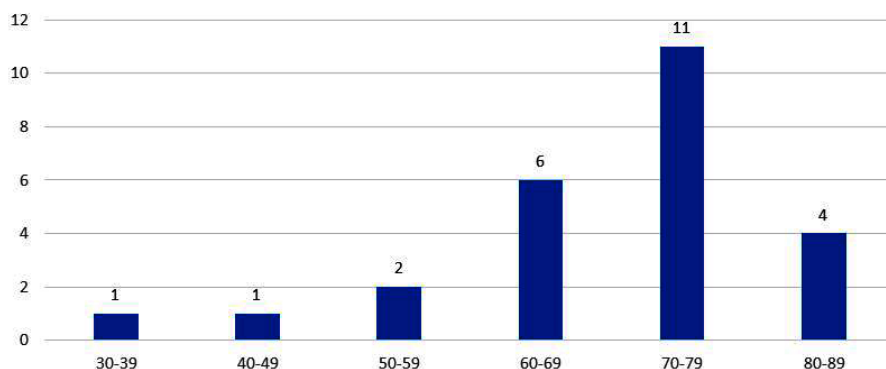


Рис. 5. Распределение докторов наук по возрастным категориям

«Прикладная геометрия и инженерная графика» (предыдущее название научной специальности 05.01.01 в Номенклатуре научных специальностей 1980 г.), может привести к засорению кафедр случайными элементами, основываясь на том мнении, что любой инженер может преподавать графические дисциплины, и о негативных последствиях для инженерного корпуса, к которому приведёт развитие текущей ситуации. А уменьшение количества кафедр геометро-графической подготовки является логичным завершением этого негативного процесса. Ведь наука в целом, как большая река. Обмелеет, если не будет постоянно питаться всеми своими ручьями, и тем более если будут уменьшаться ее истоки. На данный момент, после очередной смены номенклатуры ВАК в 2021 г., стараниями специалистов-геометров удалось отстоять научную специальность 2.5.1, которая в соответствии с [7] является правопреемником научных специальностей 05.01.01 «Инженерная геометрия и компьютерная графика» и 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования». Объединение этих специальностей основано на пересечении паспортов специальностей в части формирования цифровой электронной модели геометрии проектируемого объекта. Но возникает проблема поддержки и дальнейшего развития новой научной специальности, без которой она не может развиваться дальше. А развитие любой научной специальности напрямую зависит от подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации. И первую скрипку в этой симфонии должны играть доктора технических наук по специальности 05.01.01. Анализ информации из различных источников показывает, что в Российской Федерации (с учётом новых территорий) на текущий момент сосредоточено 25 докторов наук по специальности 05.01.01, из которых только 14 (56 %) ведут активную работу по подготовке кадров высшей квалификации, докторов и кандидатов наук, формируют научные школы.

На данный момент центры концентрации докторов наук по специальности 05.01.01 территориально охватывают три региона Российской Федерации: Москва — 5 чел., Нижний Новгород — 4 чел., Омск — 4 чел. Причём в Нижнем Новгороде и в Омске практически все доктора наук сконцентрированы в одном университете, что позволило организовать действующие диссертационные советы с правом защиты кандидатских и докторских диссертаций по специальности 2.5.1.

Если проанализировать возраст имеющихся в наличии 25 докторов наук по специальности 05.01.01 (рис. 5), то увидим, что большая их часть (15 чел.) относится к возрастной категории 70+. При этом

следует отметить по понятным причинам крайне низкую публикационную активность за последние 5 лет докторов наук в возрастной категории 80+, что затрудняет привлечение их в качестве научных руководителей, оппонентов и членов диссертационного совета.

За последние 10 лет прирост докторов наук по специальности 05.01.01 составил 5 чел. Если такая тенденция сохранится, то в ближайшие 10 лет численность докторов наук может сократиться с 25 до 15 чел. Если к этому количеству докторов наук применить ещё и поправочный коэффициент 0,56, исходя из текущей активности по подготовке кадров высшей квалификации, то получим всего 8 чел. Такое количество докторов наук по научной специальности не позволит обеспечить стабильную работу диссертационных советов и при их отсутствии приведёт к повальному сокращению кафедр геометро-графической подготовки в связи с отсутствием источника высококвалифицированных профильных научно-педагогических кадров.

Возможные пути решения проблемы сокращения количества кафедр геометро-графической подготовки. Несомненно, каждая кафедра обладает своей индивидуальной траекторией становления и развития, опирающейся на свой кадровый потенциал, но, по аналогии с медициной, если лечение не симптоматическое, то оно должно быть направлено на устранение источника проблемы. Как показал приведенный выше анализ, основным источником проблемы является отсутствие профильных высококвалифицированных научно-педагогических кадров на кафедрах геометро-графической подготовки. Поэтому для её успешного решения необходимо активизировать подготовку кадров высшей квалификации в рамках научной специальности 2.5.1 путём использования имеющихся девяти аспирантур и двух докторантур. Особенно актуальным является использование имеющегося резерва кандидатов наук для подготовки докторов наук, которые будут активно развивать свои научные школы, и вокруг них будут формироваться сильные кафедры. Только возрождение профессорской школы как источника новых научно-педагогических кадров, способно обеспечить возрождение кафедр геометро-графической подготовки. Вместе с тем не следует забывать, что доктора наук, профессора должны быть не только высшим руководящим звеном научных школ, но и направлять научные исследования кафедры. В связи с чем становится крайне актуальным высказывание академика Тимошенко С. П. [8], а именно: «... Мы выиграли войну (имеется в виду Великая Отечественная война) благодаря хорошо подготовленному инженерному корпусу,

но эта подготовка была обеспечена наличием старой царской профессуры».

Основной движущей силой в высшем образовании являются кандидаты наук, доценты. Стараниями наших коллег для их подготовки созданы все условия. Для подготовки преподавателей, кандидатов наук действует девять аспирантур. Успешно прошли переаттестацию и функционируют два диссертационных совета. Для публикации результатов исследований доступны шесть научных изданий, входящих в перечень рецензируемых научных изданий [9], в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (в скобках указана категория журнала в соответствии с рекомендациями ВАК РФ):

1. Вестник компьютерных и информационных технологий (К2).

2. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура» (К3).

3. Геометрия и графика (К2).

4. Омский научный вестник (К1).

5. Онтология проектирования (К1).

6. Русский инженер (К3).

Есть несколько постоянных научных конференций для апробации результатов научных исследований, которые включают: Международную конференцию по компьютерной графике и машинному зрению «GraphiCon»; Международную научную конференцию «Физико-техническая информатика (СРТ)»; Международные научно-технические конференции «Mechanical Science and Technology Update» и «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines», секция «Геометрическое и компьютерное моделирование».

Кроме того, был переработан и существенно дополнен новыми пунктами паспорт научной специальности в части цифровой поддержки жизненного цикла изделий, что значительно расширяет спектр потенциальных исследований в аспирантуре и докторантуре по научной специальности 2.5.1 [10]. Призываем коллег из всех технических университетов России воспользоваться этими условиями, пока ещё не исчерпан резерв высококвалифицированных научных руководителей и консультантов.

Не последнюю роль играет консолидация коллег по геометро-графическим дисциплинам и взаимная их поддержка на стадии подготовки научно-педагогических кадров, поскольку любая защита диссертации, будь то кандидатская или докторская, требует слаженного взаимодействия большого количества учёных из разных университетов. Это в первую очередь соискатель и его научный руководитель. Потом члены диссертационного совета, оппоненты, ведущая организация, коллеги, которые могут поддержать работу соискателя отзывом на автореферат, рецензенты научных трудов; и это далеко не полный перечень людей, задействованных в процессе подготовки и защиты диссертации. Поэтому важную роль играет взаимное и более активное участие кафедр ГПП в общем деле подготовки научно-педагогических кадров.

Также по аналогии со школьным курсом черчения необходима государственная поддержка в части обеспечения на законодательном уровне необходимого объёма учебной нагрузки с целью сохранения самобытных коллективов кафедр ГПП и развития научных школ при них. Поэтому предлагается за-

крепить для инженерных специальностей на уровне государственного стандарта необходимую трудоёмкость и более жесткие требования к кадровым условиям реализации основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) в отношении дисциплин геометро-графической подготовки студентов, чтобы исключить появление на кафедрах ГПП случайных людей и тем самым повысить качество инженерного образования в России.

Заключение. В заключение можно выделить следующие основные выводы и рекомендации для действующих кафедр геометро-графической подготовки по решению имеющейся проблемы сокращения кафедр ГПП в университетах России:

1. В нынешних условиях существования главной задачей кафедр ГПП является формирование кадрового состава (кандидатов и докторов наук по научной специальности 2.5.1 «Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий»). Для этого кафедры, и прежде всего заведующие кафедрами, должны направлять в действующие аспирантуры подготовленных для обучения преподавателей на основе заключённых межвузовских договоров. Формы обучения в аспирантуре существуют разнообразные: соискательство, очная. При обучении в аспирантуре университета из других городов и регионов возможно активное применение дистанционных образовательных технологий. В первую очередь рекомендуется направлять в аспирантуру при действующих диссертационных советах, поскольку в них более всего сконцентрированы доктора наук с правом научного руководства по научной специальности 2.5.1. Достижение необходимого уровня количественного и качественного обеспечения кафедр ГПП кадровым составом позволит кафедрам открыть бакалавриат по профилю, востребованному на современном производстве и максимально приближенному к научной специальности 2.5.1. Выстраивается логическая цепочка: бакалавриат → магистратура → аспирантура, характерная для выпускающих кафедр и позволяющая планомерно управлять процессом деятельности аспирантуры. Существующий ныне случайный характер появления желающих поступить в аспирантуру по специальности 2.5.1 и их чрезвычайно низкий уровень подготовки исключаются. Это один из путей достижения необходимого уровня кадрового состава кафедр ГПП. В качестве примера движения по этому пути можно привести кафедру «Инженерная геометрия и САПР» Омского государственного технического университета, открывшую в 2023 г. профиль «САПР и цифровая поддержка жизненного цикла изделий».

2. Необходимо активизировать деятельность головного научно-методического совета (ГНМС) при Министерстве высшего образования и науки Российской Федерации для незамедлительного решения назревших проблем с организацией и постановкой учебного процесса на кафедрах ГПП России. Добиваться включения ГНМС в структуру и деятельность Федеральных УМО по направлениям (машиностроение, строительство и архитектура, авиационная и ракетно-космическая техника и др.)

3. Продолжить работу по организации и проведению международной конференции по компьютерной графике, машинному зрению и обработке изображений «Графикон», на которой систематически рассматриваются вопросы формирования научно-педагогических кадров, в том числе высшей

квалификации, в части геометро-графической подготовки.

4. Организовать систему стажировок при ведущих кафедрах России через ФПК университетов с получением соответствующих свидетельств.

5. Практиковать периодическое проведение Всероссийских семинаров-совещаний ведущих кафедрами и ведущих профессоров, докторов технических наук с целью обмена опытом учебной, методической и научной работы на кафедрах ГПП с изданием сборника трудов, индексируемого в РИНЦ.

Библиографический список

1. О реализации Национальной технологической инициативы: постановление Правительства РФ от 18.04.2016 № 317 (ред. от 13.07.2022). URL: <https://nti2035.ru/documents/docs/Постановление%20Правительства%20РФ%20от%2018.04.2016%20№%20317%20в%20редакции%20от%2013.07.2022.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).

2. О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007210012> (дата обращения: 10.05.2023).

3. Атанасян А. С., Бутузов В. Ф., Кадомцев С. Б. [и др.]. Геометрия. 10–11 классы. Москва: Просвещение, 2013. 255 с.

4. Перечень поручений по итогам заседания Президиума Государственного Совета. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/71297> (дата обращения: 10.07.2023).

5. Ротков С. И. Проблемы консолидации деятельности кафедр геометрии и графики // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации (Пермь, февраль–март 2014 г.): материалы IV Междун. интернет-конф. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. С. 95–103.

6. Ротков С. И., Жилина Н. Д. Подготовка кадров высшей квалификации по специальности 05.01.01 «Инженерная геометрия и компьютерная графика» // Проблемы качества графической подготовки студентов в техническом вузе: традиции и инновации (Пермь, февраль–март 2015 г.): материалы V Междун. интернет-конф. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. Т. 1. С. 90–98.

7. О сопряжении научных специальностей номенклатуры, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, научных специальностей номенклатуры, утвержденной приказом Минобрнауки России от 23 октября 2017 г. № 1027: Рекомендация Президиума ВАК Минобрнауки России от 10.12.2021 №32/1-НС. URL: https://fgosvo.ru/files/files/Rekomendation_VAK_32_1_10122021.pdf (дата обращения: 17.07.2023).

8. Велихов Е. П., Бегелин В. Б., Кушниренко А. Г. Промышленность, инновации, образование и наука в России. Москва: Наука, 2009. 140 с.

9. 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. URL: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=91107547002&f=19537> (дата обращения: 17.07.2023).

10. Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий: паспорт научной специальности 2.5.1. URL: https://www.nngasu.ru/science/dissertation_advice/2.5.1.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

РОТКОВ Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Инженерная геометрия, компьютерная графика и автоматизированное проектирование» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ), г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 6929-7992

ORCID: 0000-0002-0662-7619

AuthorID (SCOPUS): 55533401900

Адрес для переписки: rotkov@nngasu.ru

КОНОПАЦКИЙ Евгений Викторович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия, компьютерная графика и автоматизированное проектирование» ННГАСУ, г. Нижний Новгород.

SPIN-код: 4566-6208

ORCID: 0000-0003-4798-7458

AuthorID (SCOPUS): 57188826034

ResearcherID: D-3235-2019

Адрес для переписки: e.v.konopatskiy@mail.ru

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

SPIN-код: 5623-0008

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Адрес для переписки: panchuk_kl@mail.ru

Для цитирования

Ротков С. И., Конопацкий Е. В., Панчук К. Л. Проблема сокращения кафедр геометро-графической подготовки в университетах России // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 29–37. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-29-37.

Статья поступила в редакцию 30.08.2023 г.

© С. И. Ротков, Е. В. Конопацкий, К. Л. Панчук



THE PROBLEM OF REDUCTION OF GEOMETRY AND GRAPHIC TRAINING DEPARTMENTS IN RUSSIAN UNIVERSITIES

In the article the authors raised the problem of reduction of geometry-graphic training departments in Russian universities, which for the last 16 years amounted to about 1/3. The reasons for this situation are considered, among which should be emphasized the lack of highly qualified personnel of higher qualification, capable of leading scientific schools in the profile of geometric-graphic training departments. It is proposed to activate the work of the departments of geometry-graphic training on training of scientific-pedagogical staff of higher qualification in postgraduate and doctoral studies. It is also proposed to fix for engineering specialties at the level of the state standard the necessary labor intensity and more stringent requirements to the staff conditions for the implementation of the basic professional educational program with regard to the disciplines of geometric-graphic training of students.

Keywords: problem, department, geometry-graphic training, university, staffing shortage.

References

1. O realizatsii Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy: Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 18.04.2016 № 317 (red. ot 13.07.2022) [On the implementation of the National Technological Initiative: Resolution of the Government of the Russian Federation of 18.04.2016 No. 317 (ed. of 13.07.2022)]. URL: <https://nti2035.ru/documents/docs/Постановление%20Правительства%20РФ%20от%2018.04.2016%20№%20317%20в%20редакции%20от%2013.07.2022.pdf> (accessed: 10.05.2023). (In Russ.).
2. O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda: Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21.07.2020 № 474 [On the national development goals of the Russian Federation for the period until 2030: Decree of the President of the Russian Federation of 21.07.2020 No. 474]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202007210012> (accessed: 10.05.2023). (In Russ.).
3. Atanasyan L. S., Butuzov V. F., Kadomtsev S. B. [et al.]. Geometriya. 10–11 klassy [Geometry. 10–11 grades]. Moscow, 2013. 255 p. (In Russ.).
4. Perechen' porucheniy po itogam zasedaniya Prezidiuma Gosudarstvennogo Soveta [List of instructions following the results of the meeting of the Presidium of the State Council.]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/71297> (accessed: 10.07.2023). (In Russ.).
5. Rotkov S. I. Problemy konsolidatsii deyatel'nosti kafedr geometrii i grafiki [Problems of consolidating the activities of the Departments of Geometry and Graphics] // Problemy kachestva graficheskoy podgotovki studentov v tekhnicheskom vuze: traditsii i innovatsii. *Problems of Quality of Graphic Training of Students in Technical University: Traditions and Innovations*. Perm, 2014. P. 95–103. (In Russ.).
6. Rotkov S. I., Zhilina N. D. Podgotovka kadrov vysshey kvalifikatsii po spetsial'nosti 05.01.01 «Inzhenernaya geometriya i komp'yuternaya grafika» [Training of personnel of higher qualification on specialty 05.01.01 «Engineering Geometry and Computer Graphics»] // Problemy kachestva graficheskoy podgotovki studentov v tekhnicheskom vuze: traditsii i innovatsii. *Problems of Quality of Graphic Training of Students in Technical University: Traditions and Innovations*. Perm, 2015. Vol. 1. P. 90–98. (In Russ.).
7. O sopryazhenii nauchnykh spetsial'nostey nomenklatury, utverzhdennoy prikazom Minobrnauki Rossii ot 24 fevralya 2021 g. № 118, nauchnykh spetsial'nostey nomenklatury, utverzhdennoy prikazom Minobrnauki Rossii ot 23 oktyabrya 2017 g. № 1027: Rekomendatsiya Prezidiuma VAK Minobrnauki Rossii ot 10.12.2021 № 32/1-NS [On the conjugation of scientific specialties of the nomenclature approved by the order of the Ministry of Education and Science of Russia from February 24, 2021 No. 118, scientific specialties of the nomenclature approved by the order of the Ministry of Education and Science of Russia from October 23, 2017 No. 1027: Recommendation of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia from 10.12.2021 No. 32/1-NS]. URL: https://fgosvo.ru/files/files/Rekomendation_VAK_32_1_10122021.pdf (accessed: 17.07.2023). (In Russ.).

8. Velikhov E. P., Betelin V. B., Kushnirenko A. G. Promyshlennost', innovatsii, obrazovaniye i nauka v Rossii [Industry, Innovation, Education and Science in Russia]. Moscow, 2009. 140 p. (In Russ.).

9. Perechen' retsenziruyemykh nauchnykh izdaniy, v kotorykh dolzhny byt' opublikovany osnovnyye nauchnyye rezul'taty dissertatsiy na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata nauk, na soiskaniye uchenoy stepeni doktora nauk [List of peer-reviewed scientific editions, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate of sciences, for the degree of doctor of sciences should be published]. URL: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/uploader/loader?type=19&name=91107547002&f=19537> (accessed: 17.07.2023). (In Russ.).

10. Inzhenernaya geometriya i komp'yuternaya grafika. Tsifrovaya podderzhka zhiznennogo tsikla izdeliy: Passport nauchnoy spetsial'nosti 2.5.1 [Engineering geometry and computer graphics. Digital support of product life cycle: Passport of scientific specialty 2.5.1]. URL: https://www.nngasu.ru/science/dissertation_advice/2.5.1.pdf (accessed: 10.05.2023). (In Russ.).

ROTKOV Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Engineering Geometry, Computer Graphics and Computer-Aided Design Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU), Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 6929-7992

ORCID: 0000-0002-0662-7619

AuthorID (SCOPUS): 55533401900

Correspondence address: rotkov@nngasu.ru

KONOPATSKIY Evgeniy Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Engineering Geometry, Computer Graphics and Computer-Aided Design Department, NNGASU, Nizhny Novgorod.

SPIN-code: 4566-6208

ORCID: 0000-0003-4798-7458

AuthorID (SCOPUS): 57188826034

ResearcherID: D-3235-2019

Correspondence address: e.v.konopatskiy@mail.ru

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

SPIN-code: 5623-0008

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Correspondence address: panchuk_kl@mail.ru

For citations

Rotkov S. I., Konopatskiy E. V., Panchuk K. L. The problem of reduction of geometry and graphic training departments in Russian universities // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 29 – 37. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-29-37.

Received August 30, 2023.

© S. I. Rotkov, E. V. Konopatskiy,

K. L. Panchuk



СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ С АРОЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ С ДВУМЯ ЗОНАМИ КОНТАКТА

Цилиндрические передачи с арочными зубьями обладают требуемой работоспособностью в условиях как нежестких корпусов машин, так и неизбежных погрешностей изготовления и сборки. Компенсация погрешностей осуществляется путем самоустановки колес, возможности которой в передачах с одной линией зацепления ограничены. В статье исследуется адаптивная передача с арочными зубьями с двумя зонами контакта, обеспечивающая самоустановку колес независимо от величины угла перекоса зубьев в зацеплении. Рассмотрен наиболее перспективный, в плане реализации в промышленности, способ нарезания арочных зубьев круговой резцовой головкой методом обката с единичным делением на станках ЧПУ. Решены и проиллюстрированы на примерах задачи расчета параметров процесса формообразования поверхностей арочных зубьев, обеспечивающих в зацеплении зубьев прохождение двух активных действующих линий через заданные центры пятен контакта и требуемый для реализации приближенного характера зацепления закон изменения передаточной функции.

Ключевые слова: цилиндрическая передача, арочные зубья, две зоны контакта, синтез геометрии, адаптивная передача, передаточная функция.

Введение. Вследствие линейного характера касания прямых, косых и шевронных зубьев цилиндрических эвольвентных зубчатых передач они очень чувствительны к углу перекоса осей шестерни и колеса [1–3]. При наличии этого угла функция положения в передаче приобретает пилообразную форму [1, 4], вход зубьев в зацепление происходит с ударом, вследствие чего возникают вибрации и шум передач. Более того, перекося поверхностей зубьев приводит к выходу площадок контакта на край зуба, концентрации контактных напряжений и преждевременному выходу передач из строя [1–3]. Обеспечить требуемую работоспособность в этих условиях эксплуатации позволяют передачи с арочной (криволинейной, круговой) формой зубьев (рис. 1), исследование которых начато в СССР и за рубежом во второй половине прошлого столетия [2, 3, 5] и продолжается в настоящее время как в России [2, 3, 6–11], так и за рубежом [1, 5, 12], особенно активно — в Китайской Народной Республике [13–24].

Основным преимуществом колес с арочными зубьями является то, что локализация контакта зацепления их активных поверхностей, как в продольном, так и профильном направлениях достигается в процессе изготовления одного из колес. Кроме того, повышенная изгибная прочность арочных зубьев, отсутствие осевых сил в передаче, улучшенные условия смазки и способность к самоустановке колес определяют эффективность применения цилиндрических передач с арочными зубья-

ми в высоконагруженных приводах современных машин.

Известен опыт использования этих передач в приводах цементного оборудования и прокатных станов [1], редукторах ветряных мельниц [5], шестеренчатых насосах и редукторах станков-качалок [10], конечных передач локомотивов и тракторов [2, 3]. К настоящему времени предложено полтора десятка способов изготовления арочных зубьев, отличающихся формообразующими движениями и инструментами [2, 5] и, как следствие, геометрическими параметрами активных поверхностей арочных зубьев. Характеристика способов предложенных в основном зарубежными учеными, представлена в работе [5], а разработанных в СССР и РФ — в работах [2, 3].

Главное назначение арочных зубьев — компенсировать угол перекоса путем осевого перемещения (самоустановки) одного из колес. В шевронных передачах этот процесс, вследствие значительного угла наклона зубьев, легко реализуется, а в передачах с арочными зубьями, как показано в работах [2, 3], из-за смещения рабочей линии по поверхности арочного зуба в зону с малым углом его наклона, самоустановка колеса существенно ограничена. Для решения этой проблемы предложена адаптивная передача [8] с арочными зубьями, в которой, по аналогии с шевронной передачей, реализуются две зоны контакта. Настоящая статья посвящена определению параметров процесса формообразования арочных зубьев такой передачи, исследованию

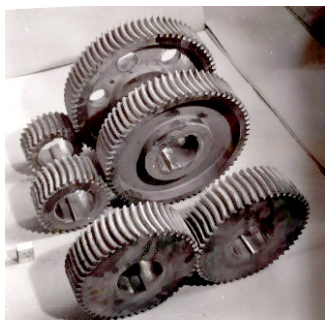


Рис. 1. Цилиндрические передачи с арочными зубьями и схема нарезания зубьев резцовой головкой

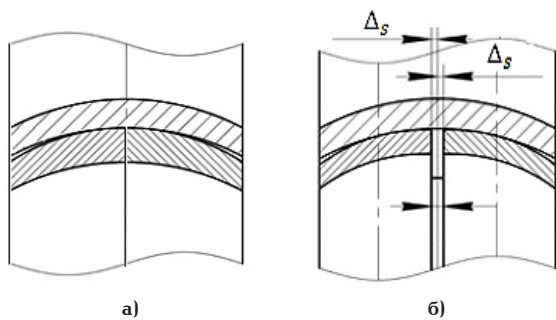


Рис. 2. Схема образования передачи с разнесенными зонами контакта

и получению требуемых геометрических и кинематических ее характеристик.

Определение геометрических параметров цилиндрических передач с арочными зубьями, обеспечивающих в их зацеплении две зоны контакта. Следуя способу [8, 11] образования в зацеплении арочных зубьев двух, разнесенных по их длине, зон контакта, колесо передачи выполняется сборным, состоящим из двух полуколес. Нарезание арочных зубьев выполняется при жестком закреплении полуколес друг относительно друга (рис. 2а), а при установке полуколес на валу между ними устанавливается прокладка, обеспечивающая смещение контактной линии из среднего сечения арочного зуба в середину зуба каждого из полуколес (рис. 2б).

В результате получается передача, подобная шевронной, но с точечным начальным контактом зубьев в зацеплении. В шевронной передаче за счет уравнивания направленных друг против друга осевых сил в зацеплениях полушевронов происходит самоустановка колес. Рассмотренный способ позволяет получить аналогичный эффект в зацеплении арочных зубьев цилиндрических передач для любого процесса их формообразования.

Среди предложенных и исследованных к настоящему времени многочисленных способов изготовления арочных зубьев цилиндрических колес [2, 3, 5], учитывая возможности современных станков с программным управлением, наиболее перспективным, с позиций использования в практике, является формообразование арочных зубьев круговой резцовой головкой методом обката с единичным делением [2, 3, 5, 6, 10], в процессе которого резцовая головка согласованно с поворотом заготовки вращается вокруг своей оси вращения совершает поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном этой

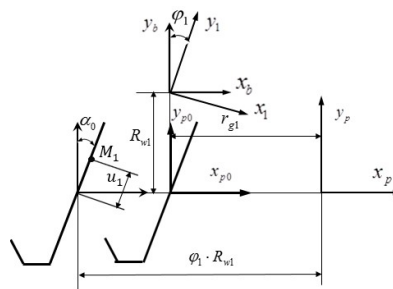


Рис. 3. Системы координат для определения элементов матрицы $\tilde{A}_{i,p}(\varphi_1)$

оси. Поверхность арочного зуба является однопараметрической огибающей семейства производящей поверхности круговой резцовой головки, ее математические модели построены в работе [7]. Для этого способа рассмотрим определение геометрических параметров передачи с двумя зонами контакта в зацеплении арочных зубьев.

В системе координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$, жестко связанной с резцовой головкой, проекции координат x_p, y_p, z_p радиуса-вектора $\vec{r}_p$ производящей поверхности (прямого кругового конуса) и проекции m_{xp}, m_{yp}, m_{zp} ее орта нормали $\vec{m}_p$, описаны формулами [7]:

$$\begin{aligned} x_p &= \cos \vartheta_1 (u_1 \cdot \sin \alpha_0 - r_{g1}); \quad y_p = u_1 \cdot \cos \alpha_0; \\ z_p &= \sin \vartheta_1 (u_1 \cdot \sin \alpha_0 - r_{g1}); \\ m_{px} &= \cos \alpha_0 \cdot \cos \vartheta_1; \quad m_{py} = -\sin \alpha_0; \\ m_{pz} &= \cos \alpha_0 \cdot \sin \vartheta_1, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_1, ϑ_1 — линейный и угловой параметры текущей точки M_1 (рис. 3) прямого кругового конуса при обработке вогнутой поверхности арочного зуба шестерни; α_0 — угол профиля исходного производящего контура; r_{g1} — расчетный радиус резцовой головки.

В процессе нарезания арочного зуба система координат $S_p(x_p, y_p, z_p)$ относительно системы координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, жестко связанной с шестерней, совершает в зависимости от угла поворота φ_1 (параметр обкатки) шестерни вокруг оси z_1 при формообразовании арочного зуба, движения, описываемые (рис. 3) матрицей перехода $\tilde{A}_{i,p}(\varphi_1)$. Поверхность арочного зуба в этом случае является однопараметрической огибающей семейства производящих поверхностей [7]:

$$\begin{aligned} \vec{r}_i(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) &= \tilde{A}_{i,p}(\varphi_1) \cdot \vec{r}_p(u_1, \vartheta_1); \\ \vec{m}_i(\vartheta_1, \varphi_1) &= \tilde{A}_{i,p}(\varphi_1) \cdot \vec{m}_p(\vartheta_1); \\ f_i(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) &= \\ &= \vec{m}_p(\vartheta_1) \cdot \tilde{A}_{i,p}^{-1}(\varphi_1) \frac{d\tilde{A}_{i,p}(\varphi_1)}{d\varphi_1} \vec{r}_p(u_1, \vartheta_1) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{r}_i(u_1, \vartheta_1, \varphi_1), \vec{r}_p(u_1, \vartheta_1), \vec{m}_p(\vartheta_1), \vec{m}_i(\vartheta_1, \varphi_1)$ — матрицы столбцы, составленные соответственно из проекций координат $x_1, y_1, z_1; x_p, y_p, z_p; m_{xp}, m_{yp}, m_{zp}$ и m_{x1}, m_{y1}, m_{z1} — радиусов-векторов $\vec{r}_1, \vec{r}_p$, орта нормали $\vec{m}_p$, орта нормали $\vec{m}_1$ поверхности арочного зуба шестерни; $f_i(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) = 0$ — уравнение связи параметров (уравнение станочного зацепления при формообразовании арочного зуба шестерни).

Раскрывая (2), выпишем проекции x_1 , y_1 , z_1 радиуса-вектора $\bar{r}_1$ вогнутой поверхности арочного зуба шестерни:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \cos \varphi_1 - B_1 \sin \varphi_1; \\ y_1 &= A_1 \sin \varphi_1 + B_1 \cos \varphi_1; \quad z_1 = C_1 \sin \vartheta_1; \\ f_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) &= \\ &= D_1 \cos \vartheta_1 - P_1 \sin \alpha_0 + r_{g1} \sin \alpha_0 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь введены обозначения: $A_1 = C_1 \cos \vartheta_1 - P_1 + r_{g1}$; $B_1 = u_1 \cdot \cos \alpha_0 - R_{w1}$; $C_1 = u_1 \cdot \sin \alpha_0 - r_{g1}$; $P_1 = \varphi_1 R_{w1}$; $D_1 = u_1 - r_{g1} \sin \alpha_0$; R_{w1} — радиус начальной окружности шестерни.

Проекции m_{x1} , m_{y1} , m_{z1} орта нормали $\bar{m}_1$ поверхности (2) в системе $S_1(x_1, y_1, z_1)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} m_{x1} &= \cos \varphi_1 \cos \alpha_0 \cos \vartheta_1 + \sin \varphi_1 \sin \alpha_0; \\ m_{y1} &= \sin \varphi_1 \cos \alpha_0 \cos \vartheta_1 - \cos \varphi_1 \sin \alpha_0; \\ m_{z1} &= \cos \alpha_0 \sin \vartheta_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Проекции x_2 , y_2 , z_2 радиуса-вектора $\bar{r}_2$ выпуклой поверхности арочного зуба колеса в системе координат $S_2(x_2, y_2, z_2)$, жестко связанной с колесом, по аналогии с (2), описываются зависимостями [7]:

$$\begin{aligned} x_2 &= A_2 \cos \varphi_2 + B_2 \sin \varphi_2; \\ y_2 &= -A_2 \sin \varphi_2 + B_2 \cos \varphi_2; \quad z_2 = C_2 \sin \vartheta_2; \\ f_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2) &= \\ &= D_2 \cos \vartheta_2 - P_2 \sin \alpha_0 + r_{g2} \sin \alpha_0 = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $A_2 = C_2 \cos \vartheta_2 - P_2 + r_{g2}$; $B_2 = u_2 \cdot \cos \alpha_0 + R_{w2}$; $C_2 = u_2 \cdot \sin \alpha_0 - r_{g2}$; $P_2 = \varphi_2 R_{w2}$; $D_2 = u_2 - r_{g2} \sin \alpha_0$; u_2 , ϑ_2 — линейный и угловой параметры производящей поверхности при обработке поверхности зуба колеса; φ_2 — угол поворота колеса в станочном зацеплении; r_{g2} — расчетный радиус резцовой головки при нарезании выпуклой стороны арочных зубьев колеса; R_{w2} — радиус начальной окружности колеса; $f_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2) = 0$ — уравнение станочного зацепления при формообразовании поверхности зуба колеса.

Для проекций m_{x2} , m_{y2} , m_{z2} орта нормали $\bar{m}_2$ поверхности (3) в системе $S_2(x_2, y_2, z_2)$ получены выражения:

$$\begin{aligned} m_{x2} &= \cos \varphi_2 \cos \alpha_0 \cos \vartheta_2 + \sin \varphi_2 \sin \alpha_0; \\ m_{y2} &= \sin \varphi_2 \cos \alpha_0 \cos \vartheta_2 - \cos \varphi_2 \sin \alpha_0; \\ m_{z2} &= \cos \alpha_0 \sin \vartheta_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим задачу расчета координат точек активной действующей линии в зацеплении арочных зубьев цилиндрической передачи. С шестерней жестко связана система координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, а с колесом — $S_2(x_2, y_2, z_2)$, которые поворачиваются соответственно на угол φ_1 и φ_2 вокруг осей z_1 и z_2 . Начало отсчета углов ψ_1 и ψ_2 шестерни и колеса в зацеплении арочных зубьев соответствует расположению осей y_1 и y_2 в осевой плоскости передачи. Положение систем координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$ и $S_2(x_2, y_2, z_2)$ по отношению друг к другу при образовании передачи задается межосевым расстоянием a_{wp} , величиной смещения Δ_s средней плоскости арочного зуба колеса вдоль оси z_2 относительно этой же плоскости арочного зуба шестерни, углом перекаса γ в зацеплении арочных зубьев и описывается матрицей перехода четвертого порядка $\bar{D}_{1,2}(\psi_1, \psi_2) = \|d_{ij}\|$, $i, j = \overline{1,4}$, элементы которой имеют вид:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \cos \psi_1 \cos \psi_2 - \sin \psi_1 \cos \gamma \sin \psi_2; \\ d_{12} &= -\cos \psi_1 \sin \psi_2 - \sin \psi_1 \cos \gamma \cos \psi_2; \\ d_{13} &= -\sin \psi_1 \sin \gamma; \quad d_{14} = \sin \psi_1 (a_{wp} + \Delta_s \sin \gamma); \\ d_{21} &= \sin \psi_1 \cos \psi_2 + \cos \psi_1 \cos \gamma \sin \psi_2; \\ d_{22} &= -\sin \psi_1 \sin \psi_2 + \cos \psi_1 \cos \gamma \cos \psi_2; \\ d_{23} &= \cos \psi_1 \sin \gamma; \quad d_{24} = -\cos \psi_1 (a_{wp} + \Delta_s \sin \gamma); \\ d_{31} &= -\sin \gamma \sin \psi_2; \quad d_{32} = -\sin \gamma \cos \psi_2; \quad d_{33} = \cos \gamma; \\ d_{34} &= -\Delta_s \cos \gamma; \quad d_{41} = d_{42} = d_{43} = 0; \quad d_{44} = 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Расчет проекций координат точки касания вогнутой поверхности арочного зуба шестерни и выпуклой поверхности арочного зуба колеса при заданных a_{wp} , Δ_s и γ выполняется путем решения обратной задачи теории пространственных зацеплений [7, 9, 25–27], представляющей собой в единой системе координат равенство проекций векторов $\bar{r}_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)$ (3), $\bar{r}_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2)$ (5) проекций ортов нормалей $\bar{m}_1(\vartheta_1, \varphi_1)$ (4), $\bar{m}_2(\vartheta_2, \varphi_2)$ (6), а также уравнений станочных зацеплений $f_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) = 0$ (3) и $f_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2) = 0$ (5). Выбирая в качестве единой системы координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, математическую модель обратной задачи запишем в виде:

$$\begin{aligned} \bar{r}_1^1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) &= \bar{D}_{1,2}(\psi_1, \psi_2, a_{wp}, \Delta_s, \gamma) \bar{r}_2^2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2); \\ \bar{m}_1^1(\vartheta_1, \varphi_1) &= \bar{D}_{1,2}(\psi_1, \psi_2, a_{wp}, \Delta_s, \gamma) \bar{m}_2^2(\vartheta_2, \varphi_2); \\ f_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) &= 0; \quad f_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь через $\bar{r}_1^1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)$, $\bar{r}_2^2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2)$, $\bar{m}_1^1(\vartheta_1, \varphi_1)$, $\bar{m}_2^2(\vartheta_2, \varphi_2)$ обозначены матрицы столбцы, составленные из проекций векторов $\bar{r}_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)$, $\bar{r}_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2)$, $\bar{m}_1(\vartheta_1, \varphi_1)$ и $\bar{m}_2(\vartheta_2, \varphi_2)$; верхний индекс в обозначении матриц отражает систему координат, в которой записан вектор; $f_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1) = 0$ и $f_2(u_2, \vartheta_2, \varphi_2) = 0$ уравнения станочного зацепления (3) и (5) при формообразовании арочных зубьев шестерни и колеса.

Поскольку равенство ортов нормалей дает только два независимых уравнения, выражения (8) представляют собой систему семи трансцендентных уравнений при восьми неизвестных: u_1 , ϑ_1 , φ_1 , u_2 , ϑ_2 , φ_2 , ψ_1 , ψ_2 . Решая при фиксированном угле поворота шестерни ($\psi_1^* = \psi_1 = \text{const}$) в рабочем зацеплении систему (8) численным методом, определяем значения параметров u_1^* , ϑ_1^* , φ_1^* , u_2^* , ϑ_2^* , φ_2^* , ψ_2^* , которые позволяют по зависимостям (3) и (5) установить искомые проекции точки касания поверхностей арочных зубьев. Варьируя величину ψ_1 в пределах углового шага шестерни, описанная процедура позволяет рассчитать все точки активной действующей линии в зацеплении арочных зубьев. При $\gamma = \Delta_s = 0$ эта линия располагается в среднем сечении арочного зуба, где угол его наклона $\beta = 0$, профиль является эвольвентным [7], а передача как в случае линейного, так и точечного касания является сопряженной. Принципиальная особенность предложенной в работе [8] адаптивной передачи заключается в необходимости расположения двух активных действующих линий в зацеплении арочных зубьев в совершенно других участках их поверхности, соответствующих середине как левого, так и правого полуколеса, в которых угол наклона зуба β обеспечивает величину осевых сил, достаточных для перемещения полуколес в процессе их самоустановки. Профиль сечений этих участков эвольвентным не является.

Известно [4, 25, 27], что наиболее важным требованием к передачам является сохранение их работоспособности при наличии погрешностей изготов-

ления и взаимного положения звеньев, в результате которых передача становится несопряженной. Для снижения чувствительности передач к погрешностям в общем случае необходима локализация контакта в обоих направлениях — как по длине, так и по высоте зуба. Впервые решение данной задачи потребовалось для получения заданных геометро-кинематических характеристик зацепления в конических и гипоидных передачах с криволинейными зубьями [25]. В настоящее время данная задача является основой современных методов синтеза различных передач с пространственным зацеплением зубьев [4, 25, 27]. Следуя этим методам, определим центр пятна контакта (ЦПК) на поверхности арочного зуба, относительно которого рассчитываются границы инерционной зоны касания, необходимой для контроля передачи. В ЦПК мгновенное передаточное отношение передачи равно отношению чисел зубьев колеса и шестерни. В качестве ЦПК на поверхности арочного зуба шестерни зададим для левого полуколеса точку M_1 с координатами:

$$z_1(u_1, \vartheta_1) = -b_w/2; \sqrt{[x_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)]^2 + [y_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)]^2} = R_{w1}, \quad (9)$$

а для правого полуколеса — точку M_2 , имеющую координаты

$$z_1(u_1, \vartheta_1) = b_w/2; \sqrt{[x_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)]^2 + [y_1(u_1, \vartheta_1, \varphi_1)]^2} = R_{w1}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) через b_w обозначена ширина зуба.

Дополняя систему (8) уравнениями (9) и решая полученную систему девяти трансцендентных уравнений при $\gamma = 0$, определим неизвестные: $u_1^*, \vartheta_1^*, \varphi_1^*, u_2^*, \vartheta_2^*, \varphi_2^*, \psi_1^*, \psi_2^*, \Delta_s^*$, при которых активная действующая линия для левого полуколеса проходит через ЦПК в точке M_1 . Аналогичным образом устанавливаются параметры ЦПК для точки M_2 при дополнении системы (8) уравнениями (10). В результате реализации рассмотренного алгоритма определяется для каждого из полуколес величина смещения Δ_s^* , обеспечивающая расположение активной действующей линии вне среднего сечения арочного зуба.

В качестве иллюстрации (рис. 4) показаны две активные действующие линии для цилиндрической передачи с арочными зубьями, имеющей параметры: числа зубьев шестерни и колеса $z_1^* = 23$ и $z_2^* = 73$; нормальный модуль $m_n = 10$ мм; коэффициенты смещения при нарезании арочных зубьев шестерни и колеса $\chi_1 = 0,44$ и $\chi_2 = 0,042$; $b_w = 120,0$ мм, $\alpha_0 = 20^\circ$, $R_{w1} = 116,115$ мм и $R_{w2} = 368,540$ мм; $a_{wp} = 484,655$ мм; $r_{g1} = 220,0$ мм, $r_{g2} = 215$ мм, то есть в продольном направлении арочного зуба контакт локализован. Величина Δ_s для левого полуколеса $\Delta_s = 0,682$ мм, для правого полуколеса $\Delta_s = -0,682$ мм.

Далее показаны результаты подобных расчетов при наличии угла перекоса $\gamma = 0,0030$ (рис. 5).

В этом случае, для того чтобы ЦПК располагались в тех же точках M_1 и M_2 , требуется самоустановка полуколес — смещение их вдоль оси вращения, соответственно, на величину $\Delta_s = 1,321$ мм и $\Delta_s = -1,321$ мм.

Сравнивая рис. 4 и рис. 5, нетрудно видеть, что геометрические параметры контакта в пере-

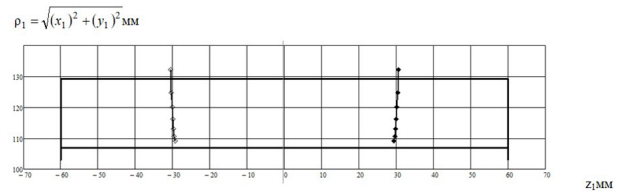


Рис. 4. Активные действующие линии в зацеплении арочных зубьев цилиндрической передачи с разнесенными зонами контакта ($\gamma=0$)

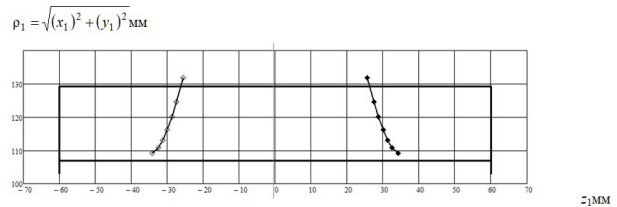


Рис. 5. Активные действующие линии в зацеплении арочных зубьев цилиндрической передачи с разнесенными зонами контакта при $\gamma = 0,0030$

даче при наличии перекоса арочных зубьев изменяются.

Синтез геометро-кинематических характеристик зацепления арочных зубьев колес цилиндрических передач. В работе [4] показано, что геометрическая сопряженность активных поверхностей зубьев для реальных передач является не достоинством, а недостатком. Вследствие погрешностей изготовления и сборки элементов реальной передачи, неизбежных деформаций зубьев и их поверхностей при работе передачи под нагрузкой, зацепление зубьев следует проектировать как приближенное, вводя преднамеренную функцию $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ ошибок угла поворота ведомого звена (ψ_2^*) в период однопарного зацепления зубьев [4]. Следуя теории реальных передач зацепления [4, 25, 27], функция ошибок (кривая Бакстера) должна представлять собой параболу, экстремум (максимум) которой соответствует касанию поверхностей зубьев шестерни и колеса в ЦПК:

$$\begin{aligned} \Delta\psi_2(\psi_1^*) &= \psi_2^* - \frac{\psi_1^* z_1^*}{z_2^*} = \\ &= \psi_2^* - i_{12} \psi_2^* z_1^* / z_2^* = -a_\psi (\psi_2^* i_{12})^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\psi_1^* = \psi_2^* i_{12}$, ψ_2^* — углы поворота соответственно шестерни и колеса в рабочем зацеплении; i_{12} — мгновенное передаточное отношение в передаче; a_ψ — коэффициент, зависящий от величины погрешностей, которые необходимо компенсировать.

Совокупность установленных в результате решения обратной задачи зацепления (8) значений ψ_1^* , ψ_2^* для точек активной действующей линии, по выражению (11), позволяет определить функцию ошибок $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ и оценить ее с позиций как предотвращения кромочных ударов при пересопрежении зубьев, так и возможности реализации в передаче приближенного зацепления зубьев. Расчет функции $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ для передачи с арочными зубьями, рабочие линии которой показаны на рис. 4, свидетельствует, что ошибка в передаточной функции отсутствует, то есть передача является сопряженной. Ситуация

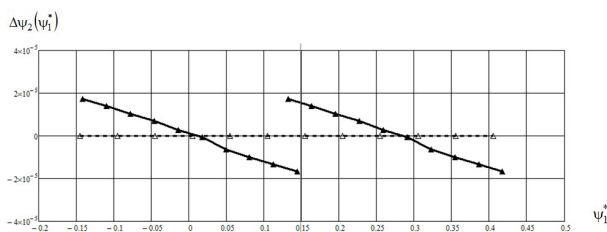


Рис. 6. Функция $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ в зацеплении арочных зубьев цилиндрической передачи с разнесенными зонами контакта при $\gamma = 0,0030$

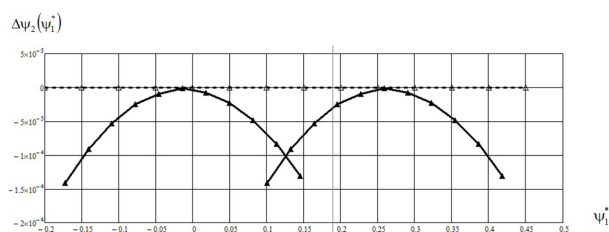


Рис. 7. Функция $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ в зацеплении арочных зубьев цилиндрической передачи при $\gamma = 0,0030$, профиль зуба колеса модифицирован

меняется принципиально, когда передача работает в условиях перекоса зубьев (рис. 5). Функция $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ приобретает пилообразную форму (рис. 6), при этом для геометрически правильного входа зубьев в зацепление необходима деформация их поверхностей.

Для исключения ударов при входе зубьев в зацепление при формообразовании криволинейных зубьев конических и гипоидных колес их профиль корректируют путем модификации движения обката в зуборезных станках с помощью специального механизма [25].

При нарезании арочных зубьев цилиндрического колеса методом обката с единичным делением на станках ЧПУ модификация профиля возможна на уровне задания связи перемещения (P_2) резцовой головки и угла поворота колеса φ_2 . Для определения этой связи воспользуемся уравнением (11). В точке геометрического пересопрежения зубьев угол поворота $\psi_1^* = \pi/z_1$, при этом, исходя из кинематической точности передачи, известна допустимая величина ее кинематической погрешности $\Delta\psi_2^*$. В этом случае из уравнения (11) найдем:

$$a_\psi = -\Delta\psi_2^* \left(z_1 / \pi \right)^2 \quad (12)$$

При любом другом угле ψ_1^* уравнение (11) позволяет через корректировку z_2 осуществить модификацию перемещения P_2 и в итоге коррекцию профиля зуба колеса при его нарезании. Для передачи рис. 5 получим $\psi_1^* = \frac{\pi}{z_1} = 0,136591$ и, задавшись $\Delta\psi_2^* = -1 \cdot 10^{-4}$, по формуле (12) определим $a_\psi = 5,359891 \cdot 10^{-3}$. Для двух пар зубьев представлены результаты расчета точек функции $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ ошибки поворота колеса с модифицированным профилем зуба в период зацепления с зубом шестерни (рис. 7).

Поскольку функция $\Delta\psi_2(\psi_1^*)$ имеет вид параболы, то зацепление зубьев в передаче является приближенным, удары при входе зубьев в зацепление отсутствуют.

Выводы

1. Предложена и реализована в программном продукте математическая модель синтеза параметров цилиндрической передачи с арочными зубьями, обеспечивающая в любой фазе их зацепления контакт в двух точках, разнесенных по длине зубьев.

2. Разработана процедура расчета коррекции поступательного движения резцовой головки при формообразовании арочного зуба на станке ЧПУ, позволяющая получить приближенный характер зацепления арочных зубьев в условиях работы передачи при наличии угла перекоса зубьев.

Библиографический список

1. Fuentes-Aznar A., Ruiz-Orzaez R., Gonzalez-Perez I. Comparison of spur, helical and curvilinear gear drives by means of stress and tooth contact analyses // *Meccanica*. 2017. Vol. 52. P. 1721 – 1738. DOI: 10.1007/s11012-016-0515-y.
2. Сызранцев В. Н., Сызранцев К. В. Цилиндрические зубчатые передачи с арочными зубьями: геометрия, прочность, надежность: моногр. Тюмень: Изд-во Тюменского промышленного университета, 2021. 170 с. ISBN 978-5-9961-2378-0.
3. Syzrantsev V. N. Cylindrical Arc Gears: History, Achievements, and Problem // *Mechanisms and Machine Science*. 2021. Vol. 101. P. 131 – 151. DOI: 10.1007/978-3-030-73022-2_6. EDN: LGNAIU.
4. Лагутин С. А. Предопределение функции ошибок в передачах с двойной модификацией зубьев // *Пространство зацеплений: докл. научн. семинара Учебно-научного центра зубчатых передач и редукторостроения*, 2001 г. / ИЖГТУ. Ижевск, 2001. С. 26 – 37.
5. Arafa H. A. C-gears: Geometry and Machining, Part C // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2005. Vol. 219, no. 7. P. 709 – 726. DOI: 10.1243/095440605X31481.
6. Бочкова Д. Е., Бобков М. Н., Золотова С. А. Обработка круговых зубьев пары цилиндрических колес с локализованной зоной касания // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 5. С. 344 – 349. EDN: PXFZWU.
7. Сызранцев В. Н., Стариков А. И. Расчет геометро-кинематических характеристик зацепления арочных зубьев цилиндрической передачи при погрешностях взаимного расположения // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2023. Т. 23, № 1. С. 5 – 18. DOI: 10.14529/engin230101.
8. Пат. 2721579 Российская Федерация, МПК F 16 H1/06. Адаптивная цилиндрическая передача с арочными зубьями / Сызранцев В. Н., Сызранцева К. В., Вибе В. П., Денисов Ю. Г. № 2019136799; заявл. 15.11.2019; опубл. 20.05.2020, Бюл. № 14.
9. Syzrantsev V., Syzrantseva K. The Arc Teeth Semi-rolled Cylindrical Gear Meshing Geometry // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19, no. 2. P. 173 – 192. DOI: 10.12700/APH.19.2.2022.2.10.
10. Паршин А. Н. Изготовление цилиндрических колес с арочными зубьями резцовыми головками на станках с ЧПУ и опыт их внедрения // *Теория и практика зубчатых передач: сб. тр. междунар. симп. / под ред. В. И. Гольдфарба*. Ижевск: Изд-во Ижевского государственного технического университета им. М. Т. Калашникова, 2014. С. 151 – 159.
11. Сызранцев В. Н. Цилиндрические передачи с разнесенными по длине арочных зубьев зонами контакта // *Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2021. Т. 24, № 2. С. 33 – 39. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-33-39. EDN: AJKQPV.
12. Arafa H. A., Bedewy M. Manufacturability and viability of different c-gear types: A comparative study // *Proc. of the ASME Design Engineering Technical Conf.* 2012. Vol. 5. P. 381. DOI: 10.1115/DETC2012-71030.
13. Chang Q., Hou. L. Parallel translating mechanism process-oriented mathematical model and 3-D model for cylindrical gears

with curvilinear shaped teeth // *Jordan Journal Mechanical and Industrial Engineering*. 2016. Vol. 10. P. 171–177.

14. Zhang Q., Hou L., Tang R. [et al.]. Method of processing and an analysis of meshing and contact of circular arc tooth trace cylindrical gears // *Transactions of FAMENA*. 2016. Vol. 40, no. 4. P. 11–24. DOI: 10.21278/TOF.40402.

15. Ma D., Ye Z., Yang H. Tooth surface reconstruction and tooth profile geometric analysis of circular arc tooth trace cylindrical gears // *Transactions of FAMENA*. 2019. Vol. 43, no. 1. P. 29–44. DOI: 10.21278/TOF.43103.

16. Jiang Y. Contact ratio calculation of involute arc gear device Academic // *Journal of Manufacturing Engineering*. 2017. Vol. 15, no. 3. P. 19–22.

17. Wu Y., Hou L., Lan L. [et al.]. Milling machine error modelling and analysis in the machining of circular-arc-tooth-trace cylindrical gears // *Transactions of FAMENA*. 2021. Vol. 44, no. 4. P. 13–29. DOI: 10.21278/TOF.444009419.

18. Zhang X., Liang Z. Mathematical model and contact characteristics of curvilinear cylindrical gears with line contact // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 43, no. 4. DOI: 10.1007/s40430-021-02894-w.

19. Zhang Q., Hou L., Tang R. [et al.]. Method of Processing and an Analysis of Meshing and Contact of Circular Arc Tooth Trace Cylindrical Gears // *Trans Famena*. 2016. Vol. 40, no. 4. P. 11–24. DOI: 10.21278/TOF.40402.

20. Liu Y., Ma D. Surface modification and tooth contact analysis of variable hyperbolic circular-arc-tooth-trace cylindrical gears // *Mechanical Sciences*. 2011. Vol. 13. P. 909–920. DOI: 10.5194/ms-13-909-2022.

21. Ma D., Liu Y., Ye Z. [et al.]. Meshing Contact Impact Properties of Circular Arc Tooth Trace Cylindrical Gear Based on Rotating Knife Dish Milling Process // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/8819818.

22. Guo R., Wei Y., Liu Y. [et al.]. Analytical solution to contact characteristics for a variable hyperbolic circular-arc-tooth-trace cylindrical gear // *Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 12. P. 923–932. DOI: 10.5194/ms-12-923-2021.

23. Wei Y., Guo R., Liu Y. [et al.]. Analytical Calculation of the Tooth Surface Contact Stress of Cylindrical Gear with Variable Hyperbolic Circular-Arc-Tooth-Trace // *Symmetry*. 2020. Vol. 12, no. 8. 1318. DOI: 10.3390/sym12081318.

24. Yongqiao W., Shuhong Y., Qi Z. [et al.]. Numerical Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Cylindrical Gears with Variable Hyperbolic Circular Arc and

Tooth Trace // *Transactions of FAMENA*. 2018. Vol. 42, no. 1. P. 61–72. DOI: 10.21278/TOF.42106.

25. Лопато Г. А., Кабатов Н. Ф., Сегаль М. Г. Конические и гипоидные передачи с круговыми зубьями: справ. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1977. 423 с.

26. Babichev D. T., Lagutin S. A., Barmina N. A. Russian School of the Theory and Geometry of Gearing. Part 2. Development of the Classical Theory of Gearing and Establishment of the Theory of Real Gearing in 1976–2000 // *New Approaches to Gear Design and Production*. 2020. Vol. 81. P. 1–46. DOI: 10.1007/978-3-030-34945-5_1.

27. Волков А. Э., Медведев В. И., Матвеев Д. С. Алгоритм оптимизационного синтеза спирально-конических зубчатых передач // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2018. № 7. С. 693–709. DOI: 10.1872/MMF-2018-59.

СЫЗРАНЦЕВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» Тюменского индустриального университета (ТИУ), г. Тюмень.

SPIN-код: 5665-5454

ORCID: 0000-0002-1422-4799

AuthorID (SCOPUS): 6507778873

ResearcherID: C-1075-2017

Адрес для переписки: syzrantsevvn@tyuiu.ru

СТАРИКОВ Александр Иванович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» ТИУ, г. Тюмень.

SPIN-код: 8635-1504

AuthorID (РИНЦ): 176570

ORCID: 0000-0001-7594-6114

AuthorID (SCOPUS): 7006814382

Адрес для переписки: starikovai@tyuiu.ru

Для цитирования

Сызранцев В. Н., Стариков А. И. Синтез адаптивной цилиндрической передачи с арочными зубьями с двумя зонами контакта // *Омский научный вестник*. 2023. № 4 (188). С. 38–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-38-45.

Статья поступила в редакцию 22.06.2023 г.

© В. Н. Сызранцев, А. И. Стариков



SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE CYLINDRICAL GEAR WITH ARCHED TEETH WITH TWO CONTACT ZONES SPACED ALONG THE LENGTH OF THE TOOTH

Cylindrical gears with arched teeth have the required performance in conditions of both non-rigid machine bodies and inevitable manufacturing and assembly errors. Error compensation is carried out by self-alignment of the wheels, the possibilities of which are limited in gears with one line of engagement. The article investigates an adaptive gear with arched teeth with two contact zones, which provides self-alignment of the wheels, regardless of the angle of misalignment of the teeth in engagement. The most promising in terms of implementation in the industry method of cutting arched teeth with a circular cutter head by the rolling method with a single division on CNC machines. Solved and illustrated by examples of the problem of calculating the parameters of the process of shaping the surfaces of arched teeth, which ensure the passage of two active lines in the meshing of the teeth through the given centers of the contact patches and the law of change of the transfer function required for the implementation of the approximate nature of the meshing.

Keywords: cylindrical gear, arched teeth, two contact zones, geometry synthesis adaptive gear, transfer function.

References

1. Fuentes-Aznar A., Ruiz-Orzaez R., Gonzalez-Perez I. Comparison of spur, helical and curvilinear gear drives by means of stress and tooth contact analyses // *Meccanica*. 2017. Vol. 52. P. 1721 – 1738. DOI: 10.1007/s11012-016-0515-y. (In Engl.).
2. Syzrantsev V. N., Syzrantseva K. V. *Tsilindricheskiye zubchatyye peredachi s arochnymi zub'yami: geometriya, prochnost', nadezhnost'* [Spur gears with arched teeth: geometry, strength, reliability]. Tyumen, 2021. 170 p. ISBN 978-5-9961-2378-0. (In Russ.).
3. Syzrantsev V. N. Cylindrical Arc Gears: History, Achievements, and Problem // *Mechanisms and Machine Science*. 2021. Vol. 101. P. 131 – 151. DOI: 10.1007/978-3-030-73022-2_6. EDN: LGNAIU. (In Engl.).
4. Lagutin S. A. Predopredeleniye funktsii oshibok v peredachakh s dvoynoy modifikatsiyey zub'yev [Predetermination of the error function in gears with double tooth modification] // *Prostranstvo zatsepleniya. Gearing Space*. Izhevsk, 2001. P. 26 – 37. (In Russ.).
5. Arafa H. A. C-gears: Geometry and Machining, Part C // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2005. Vol. 219, no. 7. P. 709 – 726. DOI: 10.1243/095440605X31481. (In Engl.).
6. Bochkova D. E., Bobkov M. N., Zolotova S. A. Obrabotka krugovykh zub'yev pary tsilindricheskikh koles s lokalizovannoy zonoy kasaniya [Processing of circular teeth of a pair of cylindrical wheels with localized touch zone] // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya Tula State University. Series Technical Sciences*. 2020. No. 5. P. 344 – 349. EDN: PXFWZU. (In Russ.).
7. Syzrantsev V. N., Starikov A. I. Raschet geometro-kinematischeskikh kharakteristik zatsepleniya arochnykh zub'yev tsilindricheskoy peredachi pri pogreshnostyakh vzaimnogo raspolzheniya [Calculation of the geometric and kinematic characteristics of the engagement of the arched teeth of a cylindrical gear with errors in the relative position] // *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroyeniye». Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*. 2023. Vol. 23, no. 1. P. 5 – 18. DOI: 10.14529/engin230101. (In Russ.).
8. Patent 2721579 Russian Federation, IPC F 16 H1/06. Adaptivnaya tsilindricheskaya peredacha s arochnymi zub'yami [Adaptive cylindrical gear with arched teeth] / Syzrantsev V. N., Syzrantseva K. V., Vibe V. P., Denisov Yu. G. No. 2019136799. (In Russ.).
9. Syzrantsev V., Syzrantseva K. The Arc Teeth Semi-rolled Cylindrical Gear Meshing Geometry // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022. Vol. 19, no. 2. P. 173 – 192. DOI: 10.12700/APH.19.2.2022.2.10. (In Engl.).
10. Parshin A. N. Izgotovleniye tsilindricheskikh koles s arochnymi zub'yami reztsovymi golovkami na stankakh s ChPU i opyt ikh vnedreniya [Arched toothed cylindrical gears manufacture on cnc lathes and experience of their inculcation] // *Teoriya i praktika zubchatykh peredach. Theory and Practice of Gearings*. Izhevsk, 2014. P. 151 – 159. (In Russ.).
11. Syzrantsev V. N. Tsilindricheskiye peredachi s raznesennymi po dline arochnykh zub'yev zonami kontakta [Cylindrical gears with contact areas distributed along the arc teeth length] // *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2021. Vol. 24, no. 2. P. 33 – 39. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-2-33-39. EDN: AJKQPV. (In Russ.).
12. Arafa H. A., Bedewy M. Manufacturability and viability of different c-gear types: A comparative study // *Proc. of the ASME Design Engineering Technical Conf.* 2012. Vol. 5. P. 381. DOI: 10.1115/DETC2012-71030. (In Engl.).

13. Chang Q., Hou L. Parallel translating mechanism process-oriented mathematical model and 3-D model for cylindrical gears with curvilinear shaped teeth // *Jordan Journal Mechanical and Industrial Engineering*. 2016. Vol. 10. P. 171–177. (In Engl.).
14. Zhang Q., Hou L., Tang R. [et al.]. Method of processing and an analysis of meshing and contact of circular arc tooth trace cylindrical gears // *Transactions of FAMENA*. 2016. Vol. 40, no. 4. P. 11–24. DOI: 10.21278/TOF.40402. (In Engl.).
15. Ma D., Ye Z., Yang H. Tooth surface reconstruction and tooth profile geometric analysis of circular arc tooth trace cylindrical gears // *Transactions of FAMENA*. 2019. Vol. 43, no. 1. P. 29–44. DOI: 10.21278/TOF.43103. (In Engl.).
16. Jiang Y. Contact ratio calculation of involute arc gear device Academic // *Journal of Manufacturing Engineering*. 2017. Vol. 15, no. 3. P. 19–22. (In Engl.).
17. Wu Y., Hou L., Lan L. [et al.]. Milling machine error modelling and analysis in the machining of circular-arc-tooth-trace cylindrical gears // *Transactions of FAMENA*. 2021. Vol. 44, no. 4. P. 13–29. DOI: 10.21278/TOF.444009419. (In Engl.).
18. Zhang X., Liang Z. Mathematical model and contact characteristics of curvilinear cylindrical gears with line contact // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 43, no. 4. DOI: 10.1007/s40430-021-02894-w. (In Engl.).
19. Zhang Q., Hou L., Tang R. [et al.]. Method of Processing and an Analysis of Meshing and Contact of Circular Arc Tooth Trace Cylindrical Gears // *Trans Famena*. 2016. Vol. 40, no. 4. P. 11–24. DOI: 10.21278/TOF.40402. (In Engl.).
20. Liu Y., Ma D. Surface modification and tooth contact analysis of variable hyperbolic circular-arc-tooth-trace cylindrical gears // *Mechanical Sciences*. 2011. Vol. 13. P. 909–920. DOI: 10.5194/ms-13-909-2022. (In Engl.).
21. Ma D., Liu Y., Ye Z. [et al.]. Meshing Contact Impact Properties of Circular Arc Tooth Trace Cylindrical Gear Based on Rotating Knife Dish Milling Process // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. DOI: 10.1155/2021/8819818. (In Engl.).
22. Guo R., Wei Y., Liu Y. [et al.]. Analytical solution to contact characteristics for a variable hyperbolic circular-arc-tooth-trace cylindrical gear // *Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 12. P. 923–932. DOI: 10.5194/ms-12-923-2021. (In Engl.).
23. Wei Y., Guo R., Liu Y. [et al.]. Analytical Calculation of the Tooth Surface Contact Stress of Cylindrical Gear with Variable Hyperbolic Circular-Arc-Tooth-Trace // *Symmetry*. 2020. Vol. 12, no. 8. 1318. DOI: 10.3390/sym12081318. (In Engl.).
24. Yongqiao W., Shuhong Y., Qi Z. [et al.]. Numerical Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Cylindrical Gears with Variable Hyperbolic Circular Arc and Tooth Trace // *Transactions of FAMENA*. 2018. Vol. 42, no. 1. P. 61–72. DOI: 10.21278/TOF.42106. (In Engl.).
25. Lopato G. A., Kabatov N. F., Segal' M. G. Konicheskiye i gipoidnyye peredachi s krugovymi zub'yami [Bevel and hypoid gears with circular teeth]. 2nd ed. Moscow, 1977. 423 p. (In Russ.).
26. Babichev D. T., Lagutin S. A., Barmina N. A. Russian School of the Theory and Geometry of Gearing. Part 2. Development of the Classical Theory of Gearing and Establishment of the Theory of Real Gearing in 1976–2000 // *New Approaches to Gear Design and Production*. 2020. Vol. 81. P. 1–46. DOI: 10.1007/978-3-030-34945-5_1. (In Engl.).
27. Volkov A. E., Medvedev V. I., Matveyenkov D. S. Algoritm optimizatsionnogo sinteza spiral'no-konicheskikh zubchatykh peredach [Algorithm of optimisation synthesis of spiral bevel gears] // *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye. Modern Mechanical Engineering. Science and Education*. 2018. No. 7. P. 693–709. DOI: 10.1872/MMF-2018-59. (In Russ.).

SYZRANTSEV Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Machines and Equipment for the Oil and Gas Industry Department, Industrial University of Tyumen (IUT), Tyumen.
 SPIN-code: 5665-5454
 ORCID: 0000-0002-1422-4799
 AuthorID (SCOPUS): 6507778873
 ResearcherID: C-1075-2017
 Correspondence address: syzrantsevn@tyuiu.ru

STARIKOV Aleksander Ivanovich, Senior Lecturer of Mechanical Engineering Technology Department, IUT, Tyumen.
 SPIN-code: 8635-1504
 AuthorID (RSCI): 176570
 ORCID: 0000-0001-7594-6114
 AuthorID (SCOPUS): 7006814382
 Correspondence address: starikovai@tyuiu.ru

For citations

Syzrantsev V. N., Starikov A. I. Synthesis of an adaptive cylindrical gear with arched teeth with two contact zones spaced along the length of the tooth // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 38–45. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-38-45.

Received June 22, 2023.

© V. N. Syzrantsev, A. I. Starikov



ПОДБОР ПЫЛЕОЧИСТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТИПА ЦИКЛОН ДЛЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Металлообрабатывающее производство является одним из основополагающих промышленных производств, и образование при технологических процессах металлической и сопутствующей пыли требует внедрения систем очистки от нее. Выбор пылеулавливающих агрегатов из тривиального превращается в многокритериальную задачу и требует внедрения методов ее проведения. В данной статье рассматривается метод подбора пылеочистительного оборудования на примере пыли от шлифовальных станков на основе метода анализа иерархий.

Ключевые слова: очистка от пыли, металлорежущие производства, метод анализа иерархий, подбор пылеуловителя циклонного типа, параметры пылеуловителя, локальные векторы критериев, вектор глобальных приоритетов.

Анализ пыли. Металлообрабатывающее производство является одним из основополагающих промышленных производств, влекущих за собой образование при технологических процессах металлической и сопутствующей пыли, которая отрицательно влияет на здоровье персонала. В пыли содержатся частицы, которые имеют острую травмирующую форму и способствуют развитию заболевания легочных путей (фиброз) и, как следствие, заболеваний сердца. Для предотвращения вредных для здоровья последствий необходимо внедрение систем очистки и оптимальный подбор пылеуловителя. Выбор пылеулавливающих агрегатов из тривиального превращается в многокритериальную задачу анализа и требует внедрения методов ее проведения. В настоящее время предприятия по металлообработке в основном оснащаются пылеуловителями циклонного типа в связи с их универсальностью, простотой использования и долговечностью [1]. Эффективность газоочистки в подобных аппаратах колеблется от 80 до 97 % и ограничена дисперсностью пыли не более чем 3-го класса с медианным диаметром от 10 мкм и больше [2]. Целью данной работы является применение метода анализа иерархий для выбора пылеулавливающего оборудования циклонного типа для металлообрабатывающих производств.

В качестве примера для подбора пылеуловителя рассмотрим пыль, которая образуется в процессе работы на шлифовальном, полировальном или фрезерном оборудовании в конкретных условиях. Рассмотрим пыль типа абразив и сталь: кожух шлифо-

вального станка. Зададим пыль в виде интегральной кривой распределения массовой доли частиц пыли по фракциям (рис. 1).

На оси ординат (рис. 1) выделяем точки, соответствующие массовой доле пыли 15,9 %, 50 % и 84,1 %, для которых по интегральной кривой распределения находим медианный диаметр d_{50} и соответствующие значения диаметров частиц пыли в мкм:

$$d_{15,9} = 3,5; d_{50} = 16,1; d_{84,1} = 40.$$

В соответствии с [3] находим среднеквадратичное отклонение диаметров частиц для нашей пыли: $\sigma = 3,54$.

Медианный диаметр d_{50} и среднеквадратичное отклонение σ определяют наклон графика пыли и позволяют определить ее класс — данная пыль находится на границе III и IV классов и относится к мелкодисперсной пыли, очистка которой вызывает у циклонов определенные трудности, и выбор пылеуловителя должен быть обоснован [4].

Метод подбора пылеуловителя. Для реализации задачи сравнительного анализа пылеулавливающего оборудования циклонного типа будем использовать метод анализа иерархий (далее МАИ), разработанный ученым Т. Саати в 70-х годах прошлого века [5]. Метод позволяет осуществить выбор среди нескольких альтернатив по критериям, связанным одновременно со всеми альтернативами, и использовать при этом механизм как экспертной, так и аналитической оценки. Метод анализа иерархий применяется для решения задач охраны окружа-

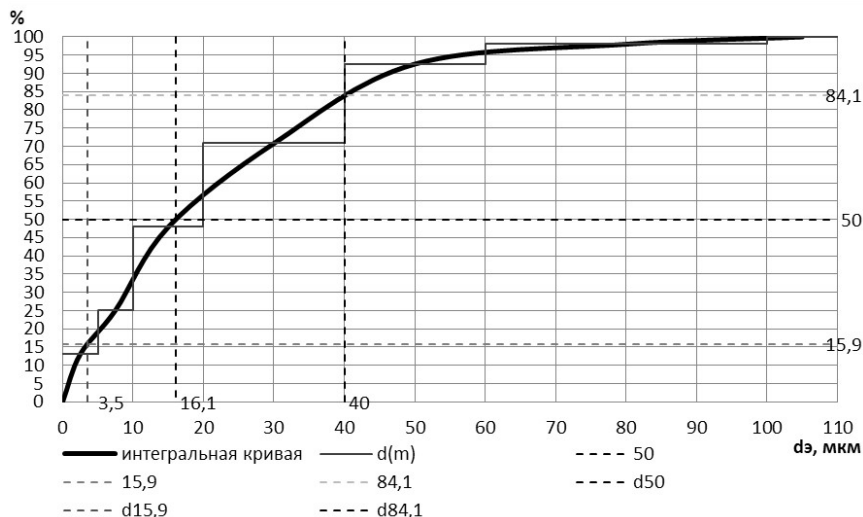


Рис. 1. Интегральная кривая распределения массовой доли частиц пыли по фракциям



Рис. 2. Иерархия проблемы выбора циклона пылеуловителя металлообрабатывающего производства

ющей среды и промышленной экологии, но в основном для выбора стратегий [6] или решения задач экономики или планирования [7]. Применение МАИ при решении прикладных задач по выбору и оценке оборудования [3, 8], в том числе и для пылеочистки, показало свою эффективность при выборе из широкого ряда пылеуловителей. Кроме того, сейчас достаточно много производителей [9–11] подобного оборудования, что позволяет использовать метод для сравнительного анализа компаний.

Представим задачу по выбору пылеуловителя из ряда моделей, в нашем случае циклон, в виде иерархии, в которой каждый элемент уровня связан со всеми элементами последующего (рис. 2).

Ограничимся сравнением классических циклонов одного производителя — например, ОАО «Энергомаш» [10]. Данные модели активно выпускаются в настоящее время и соответствуют требованиям современного производства [9–11] в связи с конструктивной простотой, надежностью и универсальностью. Данные по циклонам возьмем из технической документации и с сайтов производителей оборудования для очистки [4, 10]. Мы взяли шесть базовых моделей, но никто не ограничивает исследователя в более широкой выборке. Понятно, что выбор модели должен быть обоснован, и мы введем некоторые параметры для того, чтобы модели могли конкурировать на приблизительно равной основе.

Зададимся двумя параметрами:

1. Объем воздуха, подвергаемый очистке, 3500 м³/ч;

2. Степень очистки в пылеуловителе не менее 80 %.

Если с производительностью все более менее понятно — мы просто ввели значение, определенное техпроцессом, и тем самым обусловили параметры каждой модели в соответствии с производительностью, то по степени очистки необходимо сделать некоторые пояснения. Степень очистки газа η зависит от значения функции нормального распределения $F_0(x)$ (1) [3]:

$$\eta = 100 \cdot F_0(x), \quad (1)$$

где параметр x вычисляется по формуле (2):

$$x = \frac{\lg \frac{d_{50}}{d_m}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\tau + \lg^2 \sigma}}. \quad (2)$$

Тарировочные значения нам известны из [4], значения пыли d_{50} и σ определены выше. Зная максимальное значение d_{50}^T , примем выражение под корнем, близкое к единице (3):

$$d_m = d_{50}^T \sqrt{\frac{D \cdot \rho_q^T \cdot \mu \cdot v_T}{D_T \cdot \rho_q \cdot \mu_T \cdot v}}. \quad (3)$$

Значение диаметра пылеуловителя D зависит от количества очищаемого газа и варьируется обычно в пределах 0,5–1,2 м. При том что $D_T = 0,6$ м, их отношение будет в пределах (4).



$$\frac{D_{cp}}{D_T} = \frac{(0,5 + 1,2) / 2}{0,6} = 1,83. \quad (4)$$

Плотность частиц пыли колеблется в пределах от 900 – 7000 кг/м³, и соотношение ее среднего значения $\rho_{чср}$ с тарифовочным значением $\rho_T = 1930$ кг/м³ будет значительно меньше (5)

$$\frac{\rho_{ч}^T}{\rho_{чср}} = \frac{1930}{(900 + 7000) / 2} = 0,49. \quad (5)$$

При значениях плотности пыли значительно ниже тарифовочной следует вводить повышающий коэффициент для d_m , но эти случаи можно рассматривать только как исключения.

Отношения значений динамической вязкости газа реальных и тарифовочных значений имеют одинаковый порядок и могут быть представлены как отношение (6):

$$\frac{\mu}{\mu_T} = \frac{(1,8 \cdot 10^{-5} + 2,19 \cdot 10^{-5}) / 2}{2,22 \cdot 10^{-5}} = 0,89, \quad (6)$$

а значения скорости потока не отличаются от оптимальных значений более чем на 15 % по модулю, и отношение к среднему значению составит (7):

$$\frac{v_T}{v} = 1,00. \quad (7)$$

Таким образом, среднее подкоренное выражение имеет значение, близкое к единице, а именно (8)

$$d_m = d_{50}^T \sqrt{0,8} = 0,89 d_{50}^T. \quad (8)$$

Приняв σ_T как среднее значение отклонений выборки среднеквадратичных отклонений, можно найти соотношение d_{50} к d_m , при котором значение очистки пылеуловителем составит не менее $\eta \geq 80$ % (9), получим:

$$\frac{d_{50}}{0,89 d_{50}^T} \geq 3,6 \quad \text{и, как следствие,} \quad \frac{d_{50}}{d_{50}^T} \geq 3,2. \quad (9)$$

Таким образом, пылеуловители, которые не удовлетворяют условию (9) в первом приближении, в выборку попасть не должны. В нашем случае минимальное соотношение медианного значения пыли d_{50} к значению d_m будет у пылеуловителя ЦН-15 и составит $\frac{d_{50}}{d_{50}^T} = 3,55$.

После подбора альтернатив мы переходим к выбору критериев.

В качестве критериев для сравнения моделей были выбраны: масса, высота, производительность, диаметр, среднеквадратичное отклонение и медианный диаметр пыли. Подробное описание критериев и обоснование выбора можно найти в [3]. Лишь отметим, что два из этих параметров — среднеквадратичное отклонение и медианный диаметр пыли относятся непосредственно к пыли, другие три параметра, определяющие габариты и массу изделия, относятся непосредственно к пылеуловителю. Критерий производительности является связующим звеном между двумя группами и относится как к пылеуловителю, так и непосредственно к заданной пыли.

Рассчитаем вектор локальных приоритетов критериев по методике, представленной в [5] (табл. 1).

Суждения согласованы, если параметр отношения согласованности ОС менее 0,1, то есть менее 10 %. На самом деле можно продолжить уточнять этот параметр, но основные соотношения уже не изменятся. Локальные приоритеты отдают первенство критерию массы 37 %, который мы считаем адекватным отражением цены без маркетинговых накруток или спекуляции. Далее следует критерий производительности 25 %, который определяет типоразмер модели, и 16 % отдаем параметру диаметра пыли с 50 % очисткой. Данные соотношения могут быть пересмотрены, если необходимо учесть какие-либо дополнительные ограничения, например, связанные с габаритными размерами или дисперсности очищаемой пыли.

Рассчитаем вектора альтернатив по каждому выбранному критерию согласно [3]. При сравнении альтернатив относительно каждого критерия будем придерживаться правила поиска оптимальных для пылеуловителя показателей или параметров. На-

Таблица 1

Расчет вектора приоритетов критериев

	Масса, кг	Высота, мм	Производительность, м ³ /ч	Диаметр, мм	d_{50} , мкм	$\lg \sigma_T$	Произвед.	$x = (\Pi)^{1/6}$	$w = x/s$
	C1	C2	C3	C4	C5	C6			
C1	1	7	2	5	3	4	840,0000	3,072	0,37
C2	1/7	1	1/6	1/3	1/5	1/4	0,0004	0,271	0,03
C3	1/2	6	1	4	3	2	72,0000	2,040	0,25
C4	1/6	3	1/5	1	1/3	1/2	0,0167	0,505	0,06
C5	1/3	5	1/2	3	1	2	5,0000	1,308	0,16
C6	1/4	4	1/2	2	2	1	2,0000	1,122	0,13
сумма	2,39	26,00	4,37	15,33	9,53	9,75	S =	8,318	1
							$\lambda_{\max}$	6,548	
							ИС	0,110	
							ОС	0,088	

W_c	0,37	0,03	0,25	0,06	0,16	0,13	1,00
	Масса, кг	Высота, мм	Производительность, м ³ /ч	Диаметр, мм	d_{50} , мкм	$\lg \sigma T$	W_g
W	W_m	W_h	W_p	W_d	W_{d50}	W_σ	
ЦН-11-800	0,03	0,02	0,04	0,08	0,09	0,05	0,048
ЦН-15-600	0,06	0,22	0,45	0,37	0,04	0,05	0,177
Ц-675	0,39	0,13	0,11	0,24	0,05	0,19	0,220
СДК-ЦН-33-700	0,14	0,11	0,14	0,14	0,23	0,04	0,138
СК-ЦН-34-700	0,28	0,45	0,14	0,14	0,42	0,22	0,255
СИОТ -1200	0,11	0,07	0,14	0,02	0,17	0,44	0,162

пример, если для значений d_{50} сравнение будет проводиться по наименьшему значению, то сравнение пылеуловителей по среднеквадратичному отклонению $\lg \sigma$ производится по близости тарифовочных значений к значению заданной пыли.

Объединим эти данные в сводной табл. 2. Для удобства величины весов выделены цветом в соответствии с их весом от темного к светлому. Векторы локальных приоритетов альтернатив ($W_m, W_h, W_p, W_d, W_{d50}, W_\sigma$) в совокупности представляют собой матрицу $n \times m$ (где n — количество критериев, m — альтернатив), которая умножается на матрицу столбец W_c — вектора локальных приоритетов критериев с размерностью $1 \times n$ (табл. 1). В результате мы получаем матрицу столбец W_g , которая и определяет глобальные приоритеты альтернатив с учетом приоритетов критериев. Наиболее высокий рейтинг будет соответствовать альтернативе с наибольшим значением глобального приоритета.

Наивысший рейтинг принадлежит пылеуловителю СК-ЦН-34-700, за ним следует Ц-675, наименьшее значение у циклона ЦН-11-800. Расчет пылеуловителя СК-ЦН-34-700 по методике [3] показал, что коэффициент очистки газа η в данном центробежном циклоне составит 92 %. Данный показатель является хорошим для мелкодисперсной пыли и находится близко к пределу очистки циклонами. Если требуется более тонкая очистка, то следует вводить дополнительную очистку посредством рукавных или электрофильтров.

Результаты. Применение МАИ позволило решить задачу оптимального выбора пылеуловителя циклонного типа для пыли металлообрабатывающих производств, используя процедуру многокритериального сравнения альтернатив. В данной работе подбор оборудования пылеочистки осуществлялся для мелкодисперсной абразивной пыли III—IV класса и в результате применения метода был выбран пылеуловитель СК-ЦН-34-700 со степенью очистки заданной пыли 92 %. Кроме того, было выведено условие предварительной оценки пылеуловителя по заданной пыли для исключения из выборки пылеуловителей неподходящие модели.

Для совокупной оценки рассмотрим соотношение весовых коэффициентов критериев, согласно выбранным альтернативам (рис. 3). График наглядно показывает преимущество СК-ЦН-34 за счет минимального значения диаметра пыли по очистке и его массы.

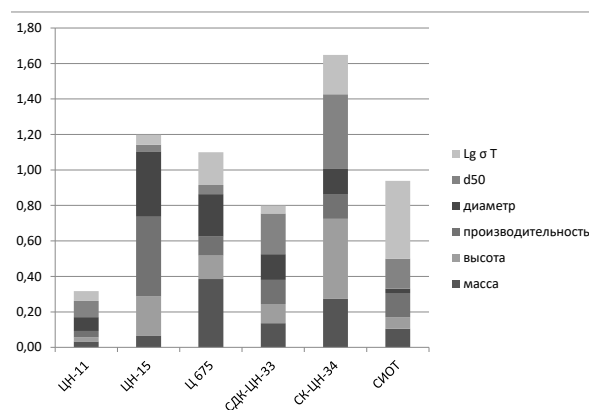


Рис. 3. Коэффициенты критериев выбранных альтернатив

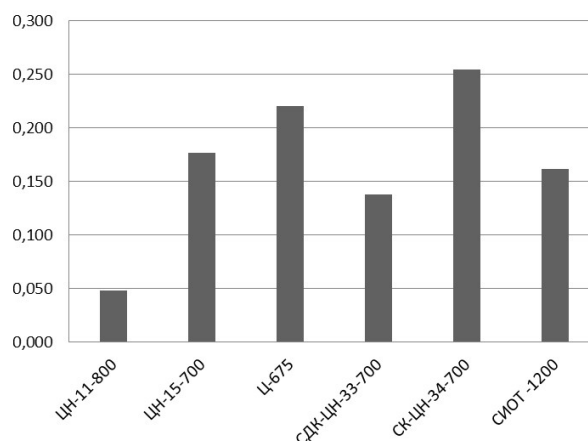


Рис. 4. Распределение глобальных приоритетов альтернатив

После введения вектора локальных приоритетов критериев W_c глобальный вектор приоритета W_g не утратил максимума для лидера, но изменил позиции весов для Ц-675 и ЦН-15, поменяв их местами, значительно уменьшив отставание от лидера СК-ЦН-34 (рис. 4).

При этом результаты анализа показывают, что Ц-675 может стать хорошей альтернативой СК-ЦН-34 при выборе пылеуловителя для выбранного типа пыли.

В заключение хочется отметить, что данный метод позволит инженерам и технологам проводить анализ имеющегося и поставляемого пылеочистительного оборудования и может быть использован как одним, так и несколькими экспертами одновременно с последующим сравнением их оценок на новом иерархическом уровне МАИ для выявления и верификации оптимальной экспертной оценки.

Библиографический список

1. Булыгин Ю. И., Панченко О. С., Романов В. А. [и др.]. Повышение эффективности обеспыливания воздуха рабочих зон металлообрабатывающих и деревообрабатывающих производств // Вестник Донского государственного технического университета. 2013. Т. 13, № 7–8 (75). С. 49–57. DOI: 10.12737/2020. EDN: SIJXCT.
2. Булыгин Ю. И., Азимова Н. Н., Купцова И. С. Проблемы проектирования пылеочистного оборудования в промышленности // Безопасность техногенных и природных систем. 2018. № 1–3. DOI: 10.23947/2541-9129-2018-1-2-2-12.
3. Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О. Использование метода анализа иерархий при выборе пылеочистительного оборудования литейного производства // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81. EDN: NTLDSH.
4. Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков В. И. [и др.]. Справочник по пыле- и золоулавливанию. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с. ISBN 5-256-00443-3.
6. Шилова Ю. В., Гладун И. В. О применении метода анализа иерархий для выбора мест строительства полигонов ТКО на неурбанизированных территориях // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2020. № 3 (40). С. 81–89. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10041. EDN: TWWKFS.
7. Юганова Т. И. Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 4. С. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93. EDN: ARIGTW.
8. Jagtap H. P., Bewoor A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power

Plant Equipments // Materials Today: Proceedings. 2017. Vol. 4, no. 2. P. 1927–1936. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.038.

9. Концерн Медведь Юг: пылеулавливающее оборудование. URL: <http://concernmedved-ug.ru/pyeulavlivayushcheye-oborudovaniye> (дата обращения: 09.11.2022).

10. ОАО «ЭНЕРГОМАШ»: Аппараты сухой очистки газов. URL: http://www.energomash-tver.ru/apparaty_sukhoj_ochistki_gazov (дата обращения: 09.11.2022).

11. СИБЭЛКОН: циклонные пылеуловители. URL: <https://sibelkon.ru/produkcziya/pyeulavlivayushhee-oborudovanie/ciklonnye-filtry/> (дата обращения: 15.12.2022).

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

SPIN-код: 2972-5037

AuthorID (РИНЦ): 440725

Адрес для переписки: v_solomin@mail.ru

БЕЛЬКОВА Софья Валентиновна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3650-6466

AuthorID (РИНЦ): 762141

Адрес для переписки: sofya_belkova@mail.ru

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

SPIN-код: 7420-4564

AuthorID (РИНЦ): 440722

Адрес для переписки: youjian@mail.ru

Для цитирования

Соломин В. Ю., Белькова С. В., Соломин В. Ю. Подбор пылеочистительного оборудования типа циклон для металлообрабатывающих производств при помощи Метода анализа иерархий // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-46-52.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023 г.

© В. Ю. Соломин, С. В. Белькова, В. Ю. Соломин

SELECTION OF DUST CLEANING EQUIPMENT SUCH AS CYCLONE FOR METALWORKING INDUSTRIES USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD

Metalworking is the main industrial production and its technological process requires dust cleaning. The choice of dust-collecting units from a trivial approach turns into a compact-multi-criteria one and requires the study of methods for its implementation. This article uses the method of selection of dust-cleaning equipment of cyclone type based on dust from metalworking industries based on the Hierarchy Analysis Method.

Keywords: dust cleaning, metalworking industries, hierarchy analysis method, dust collector of cyclone type selection, dust collector parameters, local criteria vectors, global priorities vector.

References

1. Bulygin Yu. I., Panchenko O. S., Romanov V. A. [et al.]. Povysheniye effektivnosti obespylivaniya vozdukhа rabochikh zon metalloobrabatывayushchikh i derevoobrabatывayushchikh proizvodstv [Increase of air dedusting effectiveness in functional zones of metal and wood working productions] // Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. *Vestnik of Don State Technical University*. 2013. Vol. 13, no. 7–8 (75). P. 49–57. DOI: 10.12737/2020. EDN: SIJXCT. (In Russ.).
 2. Bulygin Yu. I., Azimova N. N., Kuptsova I. S. Problemy proyektirovaniya pyleochistnogo oborudovaniya v promyshlennosti [Problems of designing dust cleaning equipment in the industry] // Bezopasnost' Tekhnogennykh i Prirodnikh Sistem. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2018. No. 1–3. DOI: 10.23947/2541-9129-2018-1-2-2-12. (In Russ.).
 3. Solomin V. Yu., Shtripling L. O. Ispol'zovaniye metoda analiza iyerarkhiy pri vybore pyleochistitel'nogo oborudovaniya liteynogo proizvodstva [Using the hierarchy analysis method when choosing dust cleaning equipment for foundry] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-8. EDN: NTLDSh. (In Russ.).
 4. Birger M. I., Val'dberg A. Yu., Myagkov V. I. [et al.]. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu [Dust and ash collection handbook]. Moscow, 1983. 312 p. (In Russ.).
 5. Saati T. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy [Decision-making. Hierarchy analysis method]. Moscow, 1993. 278 p. ISBN 5-256-00443-3. (In Russ.).
 6. Shilova Yu. V., Gladun I. V. O primenenii metoda analiza iyerarkhiy dlya vybora mest stroitel'stva poligonov TKO na ne urbanizirovannykh territoriyakh [Application of the analytic hierarchy process for selection of construction locations of the MSW landfills in non-urbanized territories] // Vestnik Priamurskogo Gosudarstvennogo Universiteta Im. Sholom-Aleykhema. *Bulletin of Sholom Aleichem Priamur State University*. 2020. No. 3 (40). P. 81–89. DOI: 10.24412/2227-1384-2020-10041. EDN: TWWKFS. (In Russ.).
 7. Yuganova T. I. Vybór uchastkov dlya razmeshcheniya ob'yektov obrashcheniya s otkhodami na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya resheniy [Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods] // Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2019. No. 4. P. 79–93. DOI: 10.31857/S0869-78092019479-93. EDN: ARIGTW. (In Russ.).
 8. Jagtap H. P., Bewoor A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments // Materials Today: Proceedings. 2017. Vol. 4, no. 2. P. 1927–1936. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.038. (In Engl.).
 9. Kontsern Medved' Yug: pyleulavlivayushcheye oborudovaniye [Concern Medved South: Dust extraction equipment]. URL: <http://concernmedved-ug.ru/pyleulavlivayushcheye-oborudovaniye> (accessed: 09.11.2023). (In Russ.).
 10. OAO «ENERGOMASH»: Apparaty sukhoy ochistki gazov [ENERGOMASH: Dry gas scrubbers]. URL: http://www.energomash-tver.ru/apparaty_sukhoj_ochistki_gazov (accessed: 09.11.2022). (In Russ.).
 11. SIBELKON: tsiklonnyye pyleuloviteli [SIBELCON: cyclonic dust collectors]. URL: <https://sibelkon.ru/produkcziya/pylulavlivayushchee-oborudovanie/ciklonnye-filtry> (accessed: 15.12.2022). (In Russ.).
- SOLOMIN Vyacheslav Yuryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial

Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2972-5037

AuthorID (RSCI): 440725

Correspondence address: v_solomin@mail.ru

BELKOVA Sofia Valentinovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3650-6466

AuthorID (RSCI): 762141

Correspondence address: sofya_belkova@mail.ru

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

SPIN-code: 7420-4564

AuthorID (RSCI): 440722

Correspondence address: youjian@mail.ru

For citations

Solomin V. Yu., Belkova S. V., Solomin V. Yu. Selection of dust cleaning equipment such as cyclone for metalworking industries using the Hierarchy Analysis Method // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-46-52.

Received September 25, 2023.

© **V. Yu. Solomin, S. V. Belkova, V. Yu. Solomin**

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ КАЗАНЬ» ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ГАЗА НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

В данной статье рассматривается один из способов повышения экономической эффективности работ Общества с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Казань» (ООО «Газпром трансгаз Казань») при эксплуатации подогревателей газа на газораспределительной станции путем замены блока подогрева газа. Описаны преимущества оборудования «ИСТОК-60» перед ПТПГ-30, приведен расчет экономического эффекта от внедрения нового оборудования. Объектом исследования является процесс эксплуатации подогревателей газа на газораспределительной станции ООО «Газпром трансгаз Казань», предметом — способ повышения экономической эффективности работы подогревателей газа.

В результате проведенного исследования доказана целесообразность замены старого оборудования на новое и рассчитан экономический эффект. Также в статье поднимаются вопросы возможности использования концепции «Бережливое производство» в процессе газораспределения. В качестве основного предложен один из методов бережливого производства — SMED.

Ключевые слова: газораспределительная станция, блок подогрева газа, пульсирующее горение, бережливое производство, потери, экономический эффект.

Сокращения

РФ — Российская Федерация
ГРС — газораспределительная станция
БПГ — блок подогрева газа
КПД — коэффициент полезного действия
БП — бережливое производство
ТПГ — теплогенератор пульсирующего горения
МСКУ — мультипроцессорные системы комплексного управления

Введение. Важной составной частью топливно-энергетического комплекса РФ является газовая промышленность. Она представляет собой систему магистральных и распределительных газопроводов, выполняющих функции транспортировки, хранения и распределения газа [1].

Для обеспечения подачи газа потребителям (населенным пунктам, промышленным объектам и др.) используются ГРС (газораспределительные станции), которые поставляют газ в заданном объеме, с необходимым уровнем давления, требуемой степени очистки и т.д.

Одним из важных узлов ГРС является БПГ (блок подогрева газа), который предназначен для подогрева газа до определённой температуры, исключения гидратообразования при дросселировании, а также поддержания необходимой температуры газа на выходе из ГРС.

Именно здесь, на выходе из ГРС, возникают большие потери газа, что ведет к нежелательным финансовым тратам. Для снижения этих потерь требуется разработка и внедрение определённых технологических решений, одним из которых может стать замена старого оборудования на новое.

Цель исследования. Целью данной работы является рассмотрение способа повышения экономической эффективности работ ООО «Газпром трансгаз Казань» при эксплуатации подогревателей газа на ГРС путем замены оборудования (БПГ), описание работы и преимуществ предлагаемого нового оборудования (БПГ) и доказательство целесообразности такой замены.



Рис. 1. Процесс газораспределения ГРС

Основная часть. Главными задачами ООО «Газпром трансгаз Казань» являются: эксплуатация магистральных газопроводов в зоне своего обслуживания Единой системы газоснабжения Российской Федерации, эксплуатация газораспределительных сетей, проектирование систем газоснабжения, капитальный и восстановительный ремонт действующих газопроводов и объектов газового хозяйства, транспортировка и поставка углеводородного сырья потребителям России и Татарстана [2].

Среди них следует особо отметить как социально значимую задачу — распределение и доведение природного газа до конечного потребителя (другими словами, практически до каждого гражданина РФ). Рассмотрим данный процесс более подробно.

Главную роль в этом процессе играет газораспределительная станция (далее ГРС). ГРС — это совокупность установок и технического оборудования, измерительных и вспомогательных систем для снижения и поддержания давления (редуцирования) газа, необходимого для подачи определенного количества газа и обеспечения его безопасного потребления. Отобразим процесс газораспределения ГРС на рис. 1.

ГРС состоит из совокупности различного вида систем и установок. Одну из ключевых ролей здесь играет оборудование, от КПД которого зависит, насколько велики будут потери природного газа при его транспортировке от ГРС к населенным пунктам (конечный потребитель). В качестве такого оборудования выступает блок (узел) подогрева газа (далее — БПГ). БПГ предназначен для подогрева газа до заданной температуры при использовании в системах газораспределения и газопотребления для исключения гидратообразования при дросселировании, а также поддержания необходимой температуры газа на выходе из ГРС [3].

В Республике Татарстан на данный момент насчитывается порядка 200 ГРС. Каждая отдельно взятая ГРС включает в себя БПГ (в зависимости от масштаба ГРС в нем может быть одна или несколько БПГ). Эффективность работы ГРС будет определяться КПД оборудования и, в том числе, возможностью применения методов БП.

Концепция БП является одним из важнейших факторов повышения эффективности и конкурентоспособности предприятия. Основными принципами БП являются:

1. «Вытягивающее» производство (то есть построение процесса производства таким образом, чтобы соотносилось предыдущей и последующей стадий производственного процесса регулировалось запросом последней).
2. Ориентация на максимальный уровень качества (обнаружение и решение проблем у истоков их возникновения).

3. Непрерывное улучшение (постоянный анализ производственного процесса и поиск путей повышения производительности).

4. Гибкость (возможность адаптироваться к изменениям спроса, отклонению срока и объемов поставок от плановых показателей и т.д.).

5. Установление долговременных отношений с заказчиком путем деления рисков, затрат и информации.

6. Минимизация муда (потерь) путем устранения всех видов деятельности, которые не приносят добавочной стоимости заказчику, максимальное использование всех ресурсов (капитал, люди, земля) [4].

БП нацелено на устранение потерь во всех сферах производства, включая отношения с заказчиками, проектирование продукции, цепи снабжения и производственного менеджмента. Целью такого производства является достижение минимальных затрат труда, сокращенных сроков по созданию новой продукции, гарантированной поставки продукции заказчику, высокого качества при минимальной стоимости.

Потеря, от которых помогает избавиться «бережливое производство», достаточно много. В литературе выделяется 8 основных видов потерь: переизготовление, транспортировка, ожидание, запасы, дефектность (брак и переделка), излишняя обработка, передвижение и отсутствие креативного подхода. После выявления потерь и структуризации их по видам необходимо подобрать соответствующие методы и инструменты бережливого производства, позволяющие устранить потери [5].

Специфика данной концепции связана с выявлением таких участков производства (в данном случае — сфера функционирования газового оборудования), которые имеют наличие излишних, но потенциально устранимых затрат.

Для решения этой проблемы можно обратиться не к традиционному пути увеличения затрат (ресурсов) на устранение этих участков, а к ликвидации самих этих участков (что, соответственно, автоматически приведет к сокращению затрат (ресурсов)) [6]. Мероприятия по устранению данных проблем включают в себя замену старого оборудования на новое, работающее в соответствии с методами БП. В случае с подогревателями газа одним из таких методов может стать SMED.

Метод SMED («Быстрая переналадка») подразумевает сокращение длительности остановки оборудования во время его переналадки. Целями применения метода SMED являются: уменьшение времени простоя оборудования и сокращение элементов «незавершенного производства» (продукции, не прошедшей всех стадий, предусмотренных технологическим процессом, а также изделий, кото-

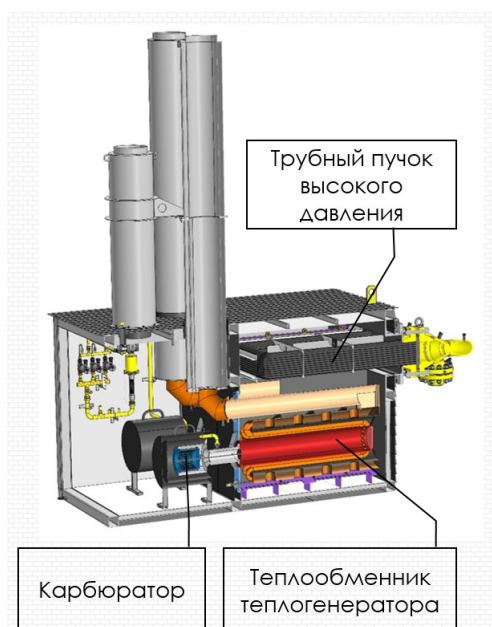


Рис. 2. БПГ «ИСТОК-60»

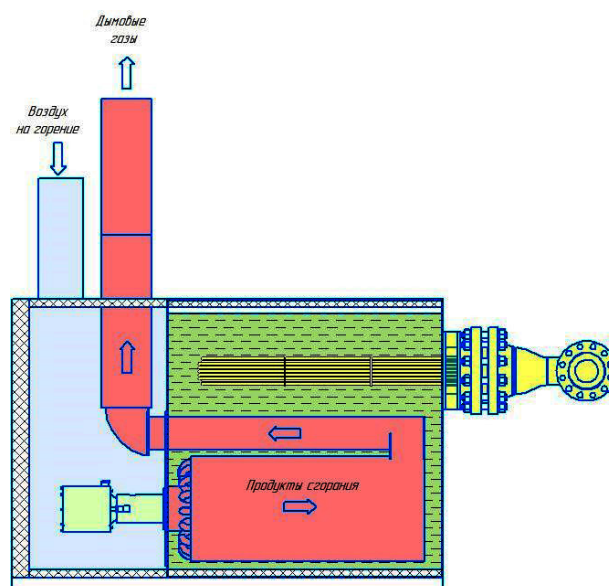


Рис. 3. Принцип работы БПГ «ИСТОК-60»

рые не были укомплектованы, испытаны и не прошли техническую приемку) [7].

В настоящий момент в качестве БПГ на ГРС используются БПГ типа ПТПГ-30. Подогреватель природного газа с жидкостным теплоносителем марки ПТПГ-30 предназначен для непрямого нагрева природного газа перед дросселированием и автоматического поддержания температуры газа на выходе из подогревателя в интервале 15–70 °С. Он используется в системах регулирования турбин ГРС индивидуального проекта [8].

По мнению авторов статьи, для более рационального и эффективного использования оборудования следует произвести замену данного оборудования на более новое — БПГ «ИСТОК-60» (а также «ИСТОК-120», «ИСТОК-180» как его модификации). Обратимся к рассмотрению данного вида оборудования более подробно.

БПГ «ИСТОК-60» является подогревателем с промежуточным теплоносителем, где в качестве источника нагрева теплоносителя используются два теплогенератора пульсирующего горения мощностью 400 кВт каждый. БПГ предназначен для подогрева природного газа, соответствующего ГОСТ 5542-2014 [9], до температуры, исключающей образование кристаллогидратов и обмерзание регуляторов давления при редуцировании, обеспечение условий для нормальной работы магистральных газопроводов, газопроводов низкого давления, а также в других технологических процессах газовой промышленности.

Корпус БПГ «ИСТОК-60» разделен специальной перегородкой, образующей два отсека. В одном располагается топливное оборудование, включая узел подачи газа для каждого теплогенератора и глушители карбюратора. Второй отсек представляет собой герметичную ванну, в нижней части которой находится теплообменник теплогенератора ТПГ-0,4 (2 шт.), а в верхней — трубный пучок высокого давления, в котором и осуществляется нагрев газа (рис. 2).

Принцип работы подогревателя БПГ «ИСТОК-60» следующий: в теплогенераторе ТПГ-0,4 тепло от продуктов сгорания передается промежу-

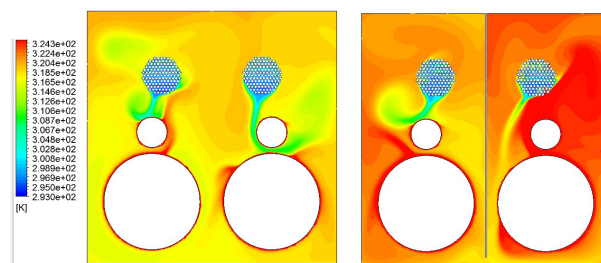


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования конвективных потоков

точному теплоносителю, который находится в емкости подогревателя. Продукты сгорания, охлаждаясь в тракте теплогенератора, выводятся через дымовую трубу. Далее тепло от нагретого теплоносителя передается холодному газу через пучок высокого давления, расположенный в верхней части емкости подогревателя (рис. 3).

Для повышения эффективности работы были проведены расчеты течения промежуточного теплоносителя под действием конвекции. По результатам компьютерного моделирования было введено конструкторское решение в виде центральной перегородки (отсутствующей в старом оборудовании), которое позволило увеличить степень подогрева газа на 17 % при прочих равных условиях (рис. 4).

Кроме того, хотя в данном случае методы БП напрямую не применяются, предлагаемый вариант оборудования реализует это самостоятельно, тем самым способствуя уменьшению потерь. Принцип работы подогревателя в этом случае соотносится с принципом реализации метода SMED («быстрая переналадка оборудования»), только является автоматизированным [10]. Циклограмма работы подогревателя приведена на рис. 5.

Алгоритм работы управления оборудованием направлен на поддержание постоянной температуры газа в определенном диапазоне на выходе из подогревателя по заданной циклограмме.

В БПГ «ИСТОК-60» используются два теплогенератора ТПГ-0,4 по 400кВт. Каждый из теплогенераторов имеет 3 режима тепловой мощности: ма-

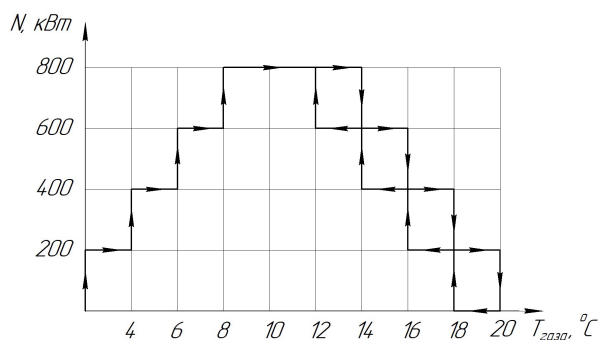


Рис. 5. Циклограмма работы подогревателя

лый (200 кВт), средний (300 кВт) и полный (400 кВт). В зависимости от расхода газа МСКУ автоматически подбирает количество работающих теплогенераторов и режим их мощности. Для исключения перегрева газа автоматика может полностью выключить оба теплогенератора и перейти в режим ожидания (в данном случае это и есть эквивалент SMED — быстрая переналадка оборудования, которая происходит автоматически в зависимости от температуры и необходимого режима работы).

При последующем увеличении расхода технологического газа и, соответственно, уменьшении его температуры, теплогенераторы запускаются и последовательно переходят на определенные тепловые режимы по заданной циклограмме (рис. 5).

Для одинаковой наработки каждого теплогенератора система управления отслеживает количество запусков каждого из них и выравнивает их.

Кроме того, стоит отметить, что БПГ «ИСТОК-60» использует в своей работе теплогенераторы пульсирующего горения. Основные преимущества пульсирующего горения:

- отсутствие горелочного устройства;
- простота конструкции и эксплуатации;
- отсутствие необходимости в высокой дымовой трубе для создания тяги;
- высокий уровень пассивной безопасности за счет малого объема камеры сгорания;
- малые размеры и масса на единицу теплопроизводительности;
- отсутствие необходимости частого обслуживания ТПГ;
- малый объем промежуточного теплоносителя, 3 м³.

При пульсирующем режиме горения возникает избыточное давление в жаровом тракте теплогенератора, благодаря чему нет необходимости создавать разрежение в топке путем установки высокой дымовой трубы. Кроме того, таким теплогенераторам не страшны сильные порывы ветра, из-за которых нередко останавливаются обычные котлы [11].

Благодаря пульсирующему горению удастся применить камеру сгорания малого объема (в несколько раз меньше топок стационарных котлов), что обеспечивает безопасность функционирования оборудования.

Сравнительная характеристика газового оборудования «ИСТОК-60» и ПТПГ-30 представлена в таблице (табл. 1) [12, 13].

Применение пульсирующего горения позволило сократить массогабаритные характеристики теплогенератора за счет увеличения интенсификации теплоотдачи от продуктов сгорания в стенку от 2 до 3 раз по сравнению со стационарным горением (в случае с ПТПГ-30), что, в свою очередь, позволило уменьшить габариты подогревателя газа. Следует также обратить внимание на то, что теплообменник изготовлен из нержавеющей жаростойкой стали и рассчитан на работу без замены на весь срок службы в течение 50 лет.

Кроме того, стоит отметить положительный эффект одного из важнейших показателей газового оборудования (КПД), который будет рассмотрен ниже.

С целью выявления положительного эффекта от замены оборудования представим несложный расчет, который позволит определить, какие потери возможно при этой замене минимизировать, а также определить примерную экономическую выгоду от данного мероприятия.

По данным за 2022 год потребление природного газа в Республике Татарстан составило примерно 225 тыс. кубометров в месяц, то есть за год примерно 2,6 млн кубометров. И это не окончательные цифры, так как ведется постоянный процесс газификации домовладений (ниже будут представлены прогнозы на 2030 год).

Основные показатели (КПД, стоимость, расход газа и срок службы) представлены в табл. 2.

Для начала рассчитаем примерные убытки от использования старого оборудования (ПТПГ-30). КПД данного оборудования составляет примерно 82 % (потери составляют примерно 18 %). В год потребляется примерно 2,6 млн кубометров, что со-

Таблица 1

Сравнительная характеристика газового оборудования «ИСТОК-60» и ПТПГ-30

Наименование параметра	«ИСТОК-60»	ПТПГ-30
Производительность по подогреваемому газу, нм ³ /ч	(10000...60000)	(7500...30000)
Номинальная тепловая мощность, кВт	800	600
Рабочее давление газа в трубном пучке, МПа	10	10
Расход топливного газа, не более, нм ³ /ч	90	110
Давление топливного газа перед теплогенератором, кПа	2...10	1...7
Коэффициент полезного действия %, не менее	95	82
Объем промежуточного теплоносителя, м ³	3	7
Масса подогревателя без промежуточного теплоносителя, не более, кг	4200	10600
Срок службы	50 лет	30 лет

Основные показатели старого (ПТПГ-30) и нового («ИСТОК-60») оборудования

Оборудование	ПТПГ-30	«ИСТОК-60»
Стоимость	20 млн рублей	20 млн рублей
КПД	82 %	95 %
Расход газа, нм ³ /ч	От 22 до 110	От 40 до 90
Срок службы	30 лет	50 лет

ставляет около 75 % от общей подачи газа (учитывая КПД). Отсюда следует, что еще около 600 тыс. кубометров газа расходуется в виде потерь (общее количество подаваемого газа составляет примерно 3,1 млн кубометров). Выразим эти потери в денежном эквиваленте. Стоимость одного кубометра газа равна примерно 4,7 руб., следовательно, потери в денежном эквиваленте составляют порядка 2,8 млн руб. ежегодно.

При замене оборудования на новое (и, соответственно, увеличении КПД до 95 %) потери природного газа в год составят примерно 100 тыс. кубометров (данные на 2022 год), что на 500 тыс. кубометров меньше, чем при эксплуатации старого оборудования. В денежном эквиваленте это сохранение порядка 2,3 млн руб. в год.

Прогнозируемое потребление природного газа в Республике Татарстан к 2030 году приблизится к отметке в 3 млн кубометров в год. При использовании старого оборудования такое повышение потребления привело бы к еще большему увеличению потерь. Так, только за один год, например, 2030 год, мы получим следующие данные:

— потери природного газа составят примерно 700 тыс. кубометров (учитывая КПД оборудования, равный 82 %);

— потери в денежном эквиваленте составят примерно 3,2 млн руб. (из расчета примерно 4,7 руб. за кубометр природного газа).

Данные цифры приводятся только для одного региона — Республики Татарстан.

Выводы и заключение. В связи с тем, что главной задачей ООО «Газпром трансгаз Казань» является распределение и доведение природного газа до конечного потребителя, важнейшее значение имеет значение КПД газового оборудования, используемого на ГРС. Поэтому предложенная замена старого оборудования (ПТПГ-30) на новое («ИСТОК-60») позволит значительно уменьшить финансовые потери.

Краткий сравнительный обзор потерь при замене оборудования на 2022 год представлен в табл. 3.

Кроме того, значительно повысится срок эксплуатации оборудования (на 20 лет), что позволит еще длительное время не прибегать к его замене. Также новое оборудование (БПГ «ИСТОК-60») работает на основе пульсирующего горения, что позволяет сократить массогабаритные характеристики теплогенератора, что, в свою очередь, способствует уменьшению габаритов подогревателя газа. Помимо этого, такие теплогенераторы не уязвимы для сильных порывов ветра, из-за которых нередко останавливается работа обычных котлов.

Также следует отметить, что предлагаемый вариант оборудования реализует в себе один из методов

Сравнительный обзор потерь при использовании старого и нового оборудования по данным расхода газа за 2022 год

Сравнительная оценка за 2022 год		
КПД оборудования	82 %	95 %
Потери природного газа в год	600 тыс. кубометров	100 тыс. кубометров
Потери в денежном эквиваленте в год	2,8 млн рублей	470 тыс. рублей

БП. Принцип работы подогревателя в данном случае соотносится с принципом реализации метода SMED («быстрая переналадка оборудования»), а отличие состоит лишь в автоматизации (рис. 5).

Итак, в случае замены оборудования при практически одинаковом выходе продукта (подогретый газ) и приблизительно одинаковой стоимости оборудования (20 млн руб.) имеется значительный экономический эффект, полученный вследствие уменьшения финансовых потерь практически в шесть раз.

Поэтому, на наш взгляд, решение о замене оборудования на новое (с учетом всех обозначенных преимуществ) является обоснованным и экономически целесообразным управленческим решением. Учитывая дополнительные факторы: отечественное производство, не связанное с зарубежными поставками комплектующих, невысокую сложность работ по замене оборудования, данное мероприятие однозначно будет способствовать повышению экономической эффективности работ ООО «Газпром трансгаз Казань» при эксплуатации подогревателей газа на ГРС.

Библиографический список

- Борисова В. В., Кузнецова Д. Ю. Современное состояние и направления развития газовой промышленности РФ // Национальная ассоциация ученых. 2021. № 66-3 (66). С. 43–46. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2021.3.66.413. EDN: AYWJFA.
- ООО «Газпром трансгаз Казань». URL: <https://kazan-tr.gazprom.ru/> (дата обращения: 12.03.2023).
- Галикеев А. Р., Китаев С. В., Гадельшина А. Р. Повышение роли газораспределительных станций при реализации ресурсосберегающих технологий в магистральном транспорте газа // Территория Нефтегаз. 2015. № 9. С. 28–32.
- Бакшеев С. Л. Теоретические аспекты бережливого производства // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 10. С. 227–230. DOI: 10.23672/SAE.2019.10.39013. EDN: ZKWXEC.
- Лепешкина Е. А. Бережливое производство как метод сокращения потерь // Наука, техника и образование. 2020. № 6 (170). С. 71–73. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/berezhливое-proizvodstvo-kak-metod-sokrascheniya-poter> (дата обращения 24.04.2023).
- Коновалова В. А., Бык В. Ф. Использование методов «бережливое производство» в производственных организациях // Electronic library of Belarusian Trade and Economics University of Consumer Cooperatives. 2016. С. 38–40. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/145190056.pdf> (дата обращения: 27.04.2023).
- Исаченко А. С., Журавлев Д. А. Сокращение времени переналадки в цехах изготовления оснастки для заготовительно-штамповочного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 10 (141). С. 21–27. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-20-28. EDN: YMZRRB.

8. Подогреватели топливного и пускового газа типа ПТПГ-30М, ГПМ-ПТПГ-30М-02. URL: <https://www.gazprommash.ru/production/catalog/ptpg/ptpg-30/> (дата обращения: 10.04.2023).
9. ГОСТ 5542-2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. Введ. 2015–07–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 13 с.
10. Журавлев А. Быстрая переналадка как метод бережливого производства // Лин-технологии: Бережливое производство. 2020. № 6. URL: <https://panor.ru/articles/bystraya-perenaladka-kak-metod-berezhlivogo-proizvodstva/57629.html#> (дата обращения: 15.04.2023).
11. Таймаров М. А., Шарипов М. Р. Котел пульсирующего горения природных и пиролизных газов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. С. 133–135. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kotyl-pulsiruyuschego-goreniya-prirodnih-i-piroliznyh-gazov> (дата обращения: 03.05.2023).
12. Блок подогрева газа БПГ «ИСТОК-60»: технические характеристики. URL: <https://www.agrs.ru/products/gas/blok-podogreva-gaza-bpg-istok-60> (дата обращения: 08.04.2023).
13. Подогреватели газа ПТПГ-30: технические характеристики. URL: <http://specmarket.ru/specifications/4705/spec.pdf> (дата обращения: 08.04.2023).

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

UDC 66-935
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-53-59
EDN: XRD XFE

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

БАТТАЛОВ Андрей Фаимович, старший преподаватель кафедры систем автоматизации и управления технологическими процессами Института управления, автоматизации и информационных технологий КНИТУ, г. Казань.

ORCID: 0000-0002-2890-666X

Адрес для переписки: abattalov954@gmail.com

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023 г.

© М. О. Шальнев, Я. В. Денисова,
А. Ф. Батталов

**M. O. SHALNEV
YA. V. DENISOVA
A. F. BATTALOV**

**Kazan National Research
Technological University,
Kazan, Russia**

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

This article discusses one of the ways to increase the economic efficiency of the Gazprom Transgaz Kazan Limited Liability Company (Gazprom Transgaz Kazan LLC) in the operation of gas heaters at a gas distribution station by replacing the gas heating unit. The advantages of the equipment «ISTOK-60» over PTPG-30 are described, the calculation of the economic effect from the introduction of new equipment is given. The object of the study is the process of operating gas heaters at the gas distribution station of ООО Gazprom Transgaz Kazan, the subject is a method for increasing the economic efficiency of gas heaters.

As a result of the study, the expediency of replacing old equipment with new one is proved and the economic effect is calculated. The article also raises questions about the possibility of using the concept of «Lean production» in the process of

gas distribution. One of the methods of lean manufacturing — SMED is proposed as the main one.

Keywords: gas distribution station, gas heating unit, pulsating combustion, lean production, losses, economic effect.

References

1. Borisova V. V., Kuznetsova D. Yu. Sovremennoye sostoyaniye i napravleniya razvitiya gazovoy promyshlennosti RF [Current state and directions of development of the gas industry of the Russian Federation] // *Natsional'naya assotsiatsiya uchenykh. National Association of Scientists*. No. 66-3 (66). P. 43–46. DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2021.3.66.413. EDN: AYWJFA. (In Russ.).
2. ООО «Газпром трансгаз Казань» [Gazprom Transgaz Kazan LLC]. URL: <https://kazan-tr.gazprom.ru/> (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).
3. Galikeyev A. R., Kitayev S. V., Gadel'shina A. R. Povysheniye roli gazoraspredeletel'nykh stantsiy pri realizatsii resursosberegayushchikh tekhnologiy v magistral'nom transporte gaza [Enhancing the role of gas distribution plants in the implementation of energy-saving technologies in the gas main pipelines] // *Territoriya Neftegaz. Neftegaz Territory*. 2015. No. 9. P. 28–32. (In Russ.).
4. Baksheyev S. L. Teoreticheskiye aspekty berezhlivogo proizvodstva [Theoretical aspects of lean production] // *Gumanitarnyye, sotsial'no-ekonomicheskiye i obshchestvennyye nauki. Humanitarian, Socio-economic and Social Sciences*. 2019. No. 10. P. 227–230. DOI: 10.23672/SAE.2019.10.39013. EDN: ZKWXEC. (In Russ.).
5. Lepeshkina E. A. Berezhlivoye proizvodstvo kak metod sokrashcheniya poter' [Lean production as a method of reducing loss] // *Nauka, tekhnika i obrazovaniye. Science, Technology and Education*. 2020. P. 71–73. DOI: 10.23672/SAE.2019.10.39013. EDN: ZKWXEC. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/berezhlivoye-proizvodstvo-kak-metod-sokrascheniya-poter> (accessed: 24.04.2023). (In Russ.).
6. Konovalova V. A., Byk V. F. Ispol'zovaniye metodov «berezhlivoye proizvodstvo» v proizvodstvennykh organizatsiyakh [The use of «lean production» methods in industrial organizations] // *Electronic library of Belarusian Trade and Economics University of Consumer Cooperatives*. 2016. P. 38–40. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/145190056.pdf> (accessed: 27.04.2023). (In Russ.).
7. Isachenko A. S., Zhuravlev D. A. Sokrashcheniye vremeni perenaladki v tsekhakh izgotovleniya osnastki dlya zagotovitel'no-shtampovochного proizvodstva [Reduction of changeover time of blanking and die forging tooling in manufacturing workshops] // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. No. 10 (141). P. 21–27. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-20-28. EDN: YMZRRB. (In Russ.).
8. Podogrevateli toplivnogo i puskovogo gaza tipa PTPG-30M, GPM-PTPG-30M-02 [Heaters of fuel and starting gas type PTPG-30M, GPM-PTPG-30M-02]. URL: <https://www.gazprommash.ru/production/catalog/ptpg/ptpg-30/> (accessed: 10.04.2023). (In Russ.).
9. GOST 5542-2014. Gazy goryuchiye prirodnyye promyshlennogo i kommunal'no-bytovogo naznacheniya. Tekhnicheskiye usloviya [Natural fuel gases for commercial and domestic use. Specifications]. Moscow, 2019. 13 p. (In Russ.).
10. Zhuravlev A. Bystraya perenaladka kak metod berezhlivogo proizvodstva // *Lin-tekhnologii: Berezhlivoye proizvodstvo [Quick changeover as a method of lean production] // Lin-tekhnologii: Berezhlivoye proizvodstvo. Lean Technologies: Lean Production*. 2020. No. 6. URL: <https://panor.ru/articles/bystraya-perenaladka-kak-metod-berezhlivogo-proizvodstva/57629.html#> (accessed: 15.04.2023). (In Russ.).
11. Taymarov M. A., Sharipov M. R. Kotel pul'siruyushchego goreniya prirodnykh i piroliznykh gazov [Boiler of pulsating combustion of natural and pyrolysis gases] // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013. P. 133–135. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kotlyol-pulsiruyushchego-goreniya-prirodnih-i-piroliznyh-gazov> (accessed: 05.03.2023). (In Russ.).
12. Blok podogreva gaza BPG «ISTOK-60»: tekhnicheskiye kharakteristiki [BPG «ISTOK-60» gas heating unit: technical specifications]. URL: <https://www.agrs.ru/products/gas/blok-podogreva-gaza-bpg-istok-60> (accessed: 08.04.2023). (In Russ.).
13. Podogrevateli gaza PTPG-30: tekhnicheskiye kharakteristiki [Gas heaters PTPG-30: technical specifications]. URL: <http://specmarket.ru/specifications/4705/spec.pdf> (accessed: 08.04.2023). (In Russ.).

SHALNEV Maksim Olegovich, Undergraduate of 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 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

BATTALOV Andrey Faimovich, Senior Lecturer of Systems Automation and Process Control Systems Department of the Institute of Management, Automation and Information Technologies, KNRTU, Kazan.

ORCID: 0000-0002-2890-666X

Correspondence address: abattalov954@gmail.com

For citations

Shalnev M. O., Denisova Ya. V., Battalov A. F. 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 // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 53–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-53-59.

Received May 26, 2023.

© M. O. Shalnev, Ya. V. Denisova, A. F. Battalov



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.363+06
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69
EDN: ZVLMML

А. В. КАШУБА
А. В. ШЕВКУНОВА

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

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрен энергоэффективный вентильно-индукторный электропривод применительно к электрическому подвижному составу. Он полностью удовлетворяет таким требованиям, как хорошие регулировочные свойства, высокая энергоэффективность и эксплуатационная надежность. Научная и техническая ценность результатов работы заключается в разработке алгоритма управления тяговым вентильно-индукторным двигателем, обеспечивающим снижение действующего тока при обеспечении необходимой мощности. Расчеты были произведены посредством специализированных взаимодействующих друг с другом программ FEMM и MATLAB. Материалы данного исследования представляют практическую ценность для повышения эксплуатационных и технико-экономических показателей электроподвижного состава.

Ключевые слова: вентильно-индукторный электродвигатель, алгоритм, угол управления, оптимальность, тепловые потери, форма тока, электромагнитный момент.

Введение. Электрические машины преобразуют энергию, существующую в одной форме, в другую, необходимую для конкретного использования. Они играют важную роль в быту, на производстве и в промышленности. Несмотря на то, что асинхронные двигатели и двигатели с постоянными (редкоземельными) магнитами являются наиболее используемыми в передовых технологиях [1, 2], тем не менее вентильно-индукторные двигатели (ВИД) обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами электродвигателей. ВИД отличаются относительно низкой стоимостью, надежной

и простой конструкцией, отказоустойчивостью и способностью работать при высоких скоростях вращения или температурах. Кроме того, независимая электрическая изоляция фаз, выгодно отличает их от других конкурирующих двигателей с точки зрения надежности. Помимо индивидуальной изоляции фазы, отсутствие постоянных магнитов в их конструкции и конструкция их роторов без обмоток являются двумя дополнительными особенностями, которые отличают их от других машин.

Непрерывное развитие в области силовых электронных устройств сделало вентильно-индуктор-

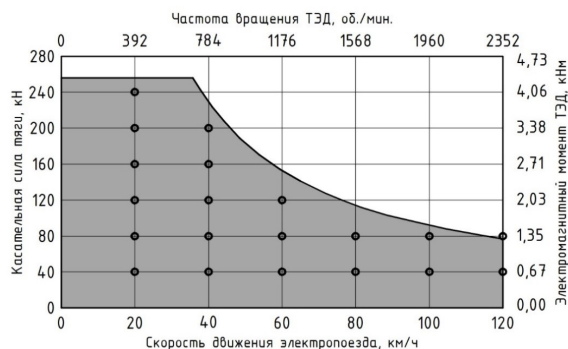


Рис. 4. Тяговая характеристика электропоезда ЭС-1

теристики послужили основой для расчета оптимальных углов управления.

Тяговый двигатель должен стабильно обеспечивать силу тяги электропоезда в достаточно широком диапазоне скоростей. Для расчета оптимальных углов управления ВИД были использованы характерные точки под графиком тяговой характеристики электропоезда ЭС-1 (рис. 4), выражающие сочетание различных частот вращения тягового электродвигателя и различных величин электромагнитного момента на его валу.

Для расчета частот вращения ТЭД $n_{ТЭД}$ в соответствии с определёнными значениями скорости движения электропоезда V_{gv} была использована следующая формула:

$$n_{ТЭД} = \frac{V_{gv} \cdot i_{рег} \cdot 30}{3,6 \cdot r_k \cdot \pi}, \quad (1)$$

где V_{gv} — скорость движения электропоезда, км/ч;
3,6 — коэффициент перевода скорости движения из единиц [км/ч] в единицы [м/с];

$i_{рег}$ — передаточное отношение редуктора, принимается $i_{рег} = 3,4$;

r_k — радиус колеса, принимается $r_k = 0,46$ м, что соответствует максимальному диаметру колеса 920 мм (табл. 1);

$\frac{30}{\pi}$ — коэффициент перевода частоты вращения ТЭД из единиц [рад/с] в единицы [об./мин].

На рис. 5 приведены введенные обозначения.

Выполнив соответствующие расчеты по формуле (1) для различных значений скорости движения электропоезда V_{gv} , получаем результаты, приведенные в табл. 1.

Для расчета электромагнитного момента на валу ТЭД M_{Σ} в соответствии с определёнными значениями касательной силы тяги электропоезда F_k была использована следующая формула:

$$M_{\Sigma} = \frac{F_k \cdot r_k}{N_{ТЭД} \cdot i_{рег}}, \quad (2)$$

где F_k — касательная сила тяги электропоезда, кН;

$N_{ТЭД}$ — количество тяговых двигателей на один электропоезд, принимается $N_{ТЭД} = 8$.

При использовании формулы (2) электромагнитный момент M_{Σ} будет иметь размерность [кН·м]. Выполнив соответствующие расчеты для различных значений касательной силы тяги электропоезда F_k , получаем результаты, приведенные в табл. 2.

При расчете оптимальных углов управления ТЭД вентильно-индукторного типа в качестве целевой функции $\mathcal{U}$ выступало выражение:

Таблица 1

Значения частот вращения ТЭД, соответствующие различным значениям скоростей движения

V_{gv} , км/ч	0	20	40	60	80	100	120
$n_{ТЭД}$, об./мин	0	392	784	1 176	1 568	1 960	2 352

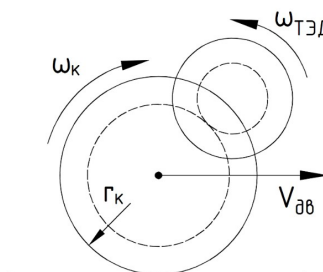


Рис. 5. Кинематическая схема тягового привода

Таблица 2

Значения электромагнитного момента ТЭД, соответствующие различным значениям касательной силы тяги

F_k , кН	0	40	80	120	160	200	240	280
M_{Σ} , кН·м	0	0,67	1,35	2,03	2,71	3,38	4,06	4,73

$$\mathcal{U}(I_g) = I_g \rightarrow \min, \quad (3)$$

где I_g — действующее значение тока фазы, А.

Параметрами оптимизации являлись угол включения θ_{on} и угол выключения θ_{off} фазы.

Таким образом, целью оптимизации являлся расчет таких углов управления ВИД, которые обеспечивали бы для каждой частоты вращения необходимый уровень электромагнитного момента при минимально возможном действующем значении тока фазы.

Форма тока фазы (т.е. зависимость тока фазы от положения ротора) во многом определяет характеристики ВИМ. Форма тока фазы зависит от множества факторов: частота вращения, напряжение питания, активное сопротивление катушек, индуктивность катушек, геометрия магнитной системы. Перечисленные факторы служили при расчетах исходными данными, а углы управления ВИД — варьируемыми параметрами.

В основу расчета формы тока положено уравнение:

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_{dk}(i_k, \theta)} \cdot \left(u_k - i_k R - \omega \cdot \frac{\partial \psi_k(i_k, \theta)}{\partial \theta} \right), \quad (4)$$

где i — ток k -ой фазы, А;

t — время, с;

L_d — дифференциальная индуктивность k -ой фазы, Гн;

θ — угловое положение ротора, эл. град.;

u — напряжение k -ой фазы, принимается $u = 1450$ В;

R — активное сопротивление фазной обмотки, принимается $R = 0,024$ Ом;

ω — угловая скорость ротора, рад/с; определяет по формуле (5);

ψ — потокосцепление k -ой фазы, Вб.

$$\omega = \frac{V_{gb} \cdot i_{peg}}{3,6 \cdot I_k} \quad (5)$$

Общий вид формы тока для ВИД представлен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, форма тока также зависит от максимального значения тока I_{max} , которое контролируется с помощью электронного преобразователя и во многом определяет средний уровень электромагнитного момента на валу ВИД. Угол наклона участков нарастания и убывания тока определяется индуктивностью фазы и частотой вращения ТЭД, которые учитываются в дифференциальном уравнении (4).

Для каждого значения частоты вращения ТЭД (табл. 1) и при различных I_{max} , θ_{on} и θ_{off} была получена форма тока. Затем посредством полевых расчетов в программе FEMM [13–15] вычислялась соответствующая зависимость электромагнитного момента от положения ротора (кривая момента). Поскольку принципиальные особенности ВИД предусматривают пульсации момента на валу, то требуется вычислять среднее значение электромагнитного момента путем интегрирования:

$$M_{cp} = \frac{1}{\Delta\theta} \int_0^{\Delta\theta} M_{\Sigma}(\theta) d\theta, \quad (6)$$

где $\Delta\theta$ — диапазон положения ротора, соответствующий интервалу повторяемости кривой момента; для трехфазных машин $\Delta\theta = 120$ эл. град.

Для соответствия уровня среднего электромагнитного момента ВИД, требуемому согласно формуле (2) и табл. 2, выбиралась такая комбинация параметров формы тока (I_{max} , θ_{on} и θ_{off}), которая обеспечивала:

1) малое отклонение среднего момента от требуемого (не более чем на 0,05 кН·м);

2) наименьшее значение действующего тока I_g из всех вариантов, удовлетворяющих первому условию.

Результаты расчета оптимальных углов управления тяговым ВИД представлены в табл. 3. В табл. 4 приведены действующие и максимальные значения тока для углов управления $\theta_{on} = -210$ эл. град. и $\theta_{off} = -30$ эл. град. Промежуточные значения оптимальных углов управления могут быть получены методами интерполяции функций двух переменных.

На рис. 7 представлено сравнение кривых момента для режима работы ТЭД, соответствующего силе тяги электропоезда $F_k = 120$ кН ($M_{cp} = 2,03$ кН·м) и скорости движения $V_{gb} = 20$ км/ч ($n_{ТЭД} = 392$ об/мин) при различных углах управления. Пунктирная линия: $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град. Сплошная линия: $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град. (оптимальные углы управления по критерию «минимум действующего значения тока фазы»).

На рис. 8 представлено сравнение кривых тока одной фазы для этого же режима работы ТЭД вентильно-индукторного типа. Пунктирная линия:

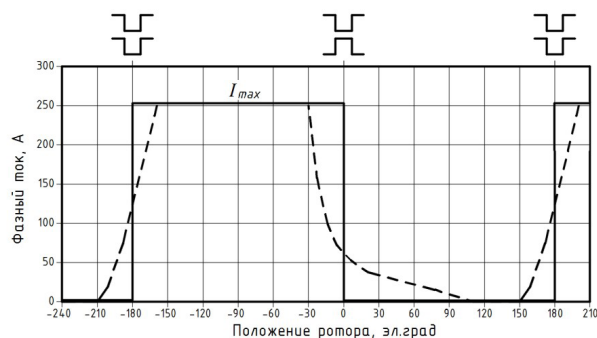


Рис. 6. Общий вид формы тока для ВИД:
сплошная линия — $n_{ТЭД} = 0$ об/мин (пусковой режим);
пунктирная линия — $n_{ТЭД} > 0$ об/мин

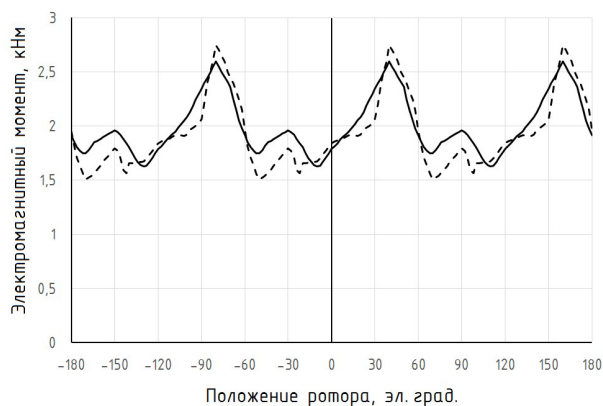


Рис. 7. Пример кривых момента ТЭД вентильно-индукторного типа при различных углах управления

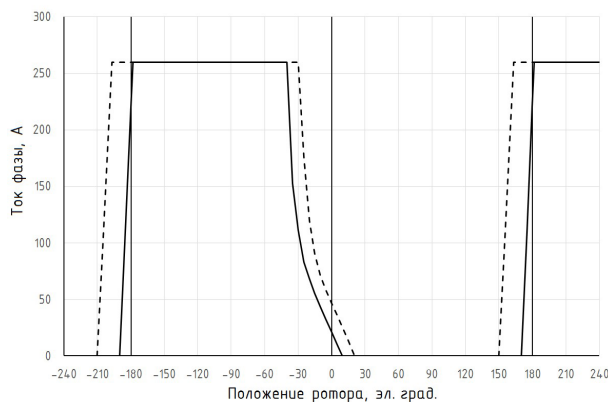


Рис. 8. Пример кривых тока ТЭД вентильно-индукторного типа при различных углах управления

$\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град. Сплошная линия: $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град. (оптимальные углы управления по критерию «минимум действующего значения тока фазы»). В данном примере величина I_{max} одинакова для обоих случаев и составляет 260 А, но разные формы тока обеспечивают разные величины действующих значений. Для углов управления $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град. действующее значение тока составляет $I_g = 183$ А, а для оптимальных углов действующее значение тока составляет $I_g = 167$ А.

Действующее значение тока за полный цикл коммутации фазы (360 эл. град.) определим по формуле:

Таблица 3

Значения оптимальных углов управления тяговым ВД

$F_k (M_k)$	Скорость движения и частота вращения ТЭД						
	0 км/ч	20 км/ч	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч	120 км/ч
	0 об/мин	392 об/мин	784 об/мин	1176 об/мин	1568 об/мин	1960 об/мин	2352 об/мин
240 кН (4,06 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_A = 325$ А $I_{max} = 500$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—	—
200 кН (3,38 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_A = 256$ А $I_{max} = 420$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_A = 264$ А $I_{max} = 420$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—
160 кН (2,71 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_A = 209$ А $I_{max} = 340$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_A = 211$ А $I_{max} = 340$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—	—
120 кН (2,03 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_A = 167$ А $I_{max} = 260$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_A = 165$ А $I_{max} = 260$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	$I_A = 163$ А $I_{max} = 300$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	—	—	—
80 кН (1,35 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_A = 121$ А $I_{max} = 180$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -20$ эл. град.	$I_A = 121$ А $I_{max} = 200$ А $\theta_{on} = -210$ эл. град. $\theta_{off} = -30$ эл. град.	$I_A = 120$ А $I_{max} = 200$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_A = 120$ А $I_{max} = 200$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_A = 127$ А $I_{max} = 220$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_A = 127$ А $I_{max} = 220$ А $\theta_{on} = -190$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.
40 кН (0,67 кНм)	$\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = 0$ эл. град.	$I_A = 77$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_A = 75$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -210$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_A = 76$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -50$ эл. град.	$I_A = 80$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -40$ эл. град.	$I_A = 76$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.	$I_A = 78$ А $I_{max} = 120$ А $\theta_{on} = -180$ эл. град. $\theta_{off} = -60$ эл. град.
0 кН (0 кНм)	—	—	—	—	—	—	—

Действующие и максимальные значения тока для углов управления
 $\theta_{on} = -210$ эл. град. и $\theta_{off} = -30$ эл. град

$F_k (M_3)$	Скорость движения и частота вращения ТЭД						
	0 км/ч	20 км/ч	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч	120 км/ч
	0 об/мин	392 об/мин	784 об/мин	1176 об/мин	1568 об/мин	1960 об/мин	2352 об/мин
240 кН (4,06 кНм)	—	$I_A = 344$ А $I_{max} = 500$ А	—	—	—	—	—
200 кН (3,38 кНм)	—	$I_A = 292$ А $I_{max} = 420$ А	$I_A = 281$ А $I_{max} = 420$ А	—	—	—	—
160 кН (2,71 кНм)	—	$I_A = 238$ А $I_{max} = 340$ А	$I_A = 232$ А $I_{max} = 340$ А	—	—	—	—
120 кН (2,03 кНм)	—	$I_A = 183$ А $I_{max} = 260$ А	$I_A = 181$ А $I_{max} = 260$ А	$I_A = 179$ А $I_{max} = 260$ А	—	—	—
80 кН (1,35 кНм)	—	$I_A = 142$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 141$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 141$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 141$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 140$ А $I_{max} = 200$ А	$I_A = 152$ А $I_{max} = 220$ А
40 кН (0,67 кНм)	—	$I_A = 86$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 87$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 88$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 89$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 89$ А $I_{max} = 120$ А	$I_A = 109$ А $I_{max} = 140$ А
0 кН (0 кНм)	—	—	—	—	—	—	—

$$I_g = \frac{\sqrt{\int_0^{360} (I(\theta))^2 d\theta}}{360} \quad (7)$$

Критерий оптимизации «минимум действующего значения тока фазы» был выбран, исходя из соображений минимизации тепловых потерь. Ведь именно действующее значение тока I_g , проходящего по проводнику, определяет количество выделяемой тепловой энергии, которое частично определяет и КПД электрической машины.

Согласно закону Джоуля–Ленца, количество теплоты, выделяемое в единицу времени в рассматриваемом участке цепи, пропорционально произведению квадрата силы тока на этом участке и сопротивления участка. Закон Джоуля–Ленца для одной фазы ВИД выражает формула (8):

$$Q_\phi = I_g^2 R t \quad (8)$$

Количество теплоты, выделяемое на всех восьми ТЭД вентильно-индукторного типа электропоезда, определяется по формуле:

$$Q_{эл.} = Q_\phi \cdot m \cdot N_{ТЭД} \quad (9)$$

где m — число фаз; двигатель НТИ-350 имеет 3 фазы;

$N_{ТЭД}$ — количество тяговых двигателей на один электропоезд, принимается $N_{ТЭД} = 8$.

Учитывая формулы (8) и (9), приведем пример расчета тепловых потерь для всех ТЭД вентильно-индукторного типа электропоезда при различных углах управления за время работы равное 1-й минуте в рассматриваемом режиме. Для выражения величин тепловых потерь в единицах [кВт·ч] учтем также переводной коэффициент, равный $3,6 \cdot 10^{-6}$.

$$Q_{эл.1} = \frac{183^2 \cdot 0,024 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 0,32 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$Q_{эл.2} = \frac{167^2 \cdot 0,024 \cdot 60 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 0,27 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $Q_{эл.1}$ — тепловая энергия, выделяемая на всех ТЭД электропоезда в течение 1-й минуты (60 секунд) при углах управления $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град.;

$Q_{эл.2}$ — тепловая энергия, выделяемая на всех ТЭД электропоезда в течение 1-й минуты (60 секунд) при оптимальных углах управления $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град.

По аналогичной методике определим величину тепловых потерь для всех ТЭД вентильно-индукторного типа электропоезда при различных углах управления за год эксплуатации при условии, что среднесуточное время работы ТЭД в рассматриваемом режиме составляет 5 часов в сутки.

$$Q_1 = \frac{183^2 \cdot 0,024 \cdot 3600 \cdot 5 \cdot 365 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 35 \, 204 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$Q_2 = \frac{167^2 \cdot 0,024 \cdot 3600 \cdot 5 \cdot 365 \cdot 3 \cdot 8}{3,6 \cdot 10^6} = 29 \, 317 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где Q_1 — величина тепловых потерь для ТЭД всех электропоездов депо за один год работы при углах управления: $\theta_{on} = -210$ эл. град., $\theta_{off} = -30$ эл. град.;

Q_2 — величина тепловых потерь для ТЭД всех электропоездов депо за один год работы при оптимальных углах управления: $\theta_{on} = -190$ эл. град., $\theta_{off} = -40$ эл. град.

Коэффициент, равный 3600, указывает количество секунд в одном часе.

Определим экономию электроэнергии ΔQ , полученную только за счет снижения тепловых потерь, для электропоезда за год эксплуатации:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 \quad (10)$$

$$\Delta Q = 35 \, 204 - 29 \, 317 = 5 \, 887 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следует отметить, что электропоезд работает в различных режимах, поэтому для оценки экономии электроэнергии введем допущение о том, что все режимы тяги могут быть равновероятны. Для этого поделим полученное значение ΔQ на количество режимов тяги, в которых наблюдается сни-

Таблица 5

Результаты расчета экономии электроэнергии

$F_{\kappa} (M_{\text{э}})$	Скорость движения и частота вращения ТЭД						
	0 км/ч	20 км/ч	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч	120 км/ч
	0 об/мин	392 об/мин	784 об/мин	1176 об/мин	1568 об/мин	1960 об/мин	2352 об/мин
240 кН (4,06 кНм)	$\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = 0 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 325 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 500 \text{ A}$ $\theta_{on} = -190 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -30 \text{ эл. град.}$	—	—	—	—	—
200 кН (3,38 кНм)	$\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = 0 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 256 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 420 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -40 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 264 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 420 \text{ A}$ $\theta_{on} = -190 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -30 \text{ эл. град.}$	—	—	—	—
160 кН (2,71 кНм)	$\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = 0 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 209 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 340 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -40 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 211 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 340 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -30 \text{ эл. град.}$	—	—	—	—
120 кН (2,03 кНм)	$\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = 0 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 167 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 260 \text{ A}$ $\theta_{on} = -190 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -40 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 165 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 260 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -30 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 163 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 300 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -30 \text{ эл. град.}$	—	—	—
80 кН (1,35 кНм)	$\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = 0 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 121 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 180 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -20 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 121 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 200 \text{ A}$ $\theta_{on} = -210 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -30 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 120 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 200 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -50 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 120 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 200 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -50 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 127 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 220 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -50 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 127 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 220 \text{ A}$ $\theta_{on} = -190 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -60 \text{ эл. град.}$
40 кН (0,67 кНм)	$\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = 0 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 77 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 120 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -40 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 75 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 120 \text{ A}$ $\theta_{on} = -210 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -50 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 76 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 120 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -50 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 80 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 120 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -40 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 76 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 120 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -60 \text{ эл. град.}$	$I_{\Lambda} = 78 \text{ A}$ $I_{\text{max}} = 120 \text{ A}$ $\theta_{on} = -180 \text{ эл. град.}$ $\theta_{off} = -60 \text{ эл. град.}$
0 кН (0 кНм)	—	—	—	—	—	—	—

жение тепловых потерь за счет изменения углов управления ТЭД. Количество таких режимов составляет 20.

Тогда экономия электроэнергии для рассматриваемого режима за год будет определяться по формуле:

$$\Delta Q_{cp} = \frac{\Delta Q}{20}. \quad (11)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\Delta Q_{cp} = \frac{5\,887}{20} = 294 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Аналогичные расчеты, выполненные для всех режимов тяги электропоезда, для которых наблюдается снижение тепловых потерь за счет изменения углов управления ТЭД, представлены в табл. 5.

Таким образом, снижение тепловых потерь для одного электропоезда (с учетом возможности работы во всех режимах тяги) в год $\Delta Q_{эл.}$ определяется как сумма всех значений ΔQ_{cp} и составляет 6 286 кВт·ч.

При условии, что количество электропоездов в депо $N_{эл.}$ составляет 20, экономия электроэнергии для всего депо за один год работы ΔQ_{geno} определяется по формуле:

$$\Delta Q_{geno} = \Delta Q_{эл.} \cdot N_{эл.} \quad (12)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\Delta Q_{geno} = 6\,286 \cdot 20 = 125\,717 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следует также отметить, что полученный результат учитывает экономию электроэнергии только за счет снижения активных потерь. Однако не учтена разница потерь на вихревые токи, перемагничивание стали и другие электромагнитные процессы, которые также являются важными составляющими потерь. Кроме того, в долгосрочной перспективе экономический эффект включает в себя и разницу в интенсивности старения изоляции за счет разного нагрева.

Выводы. Данное исследование было посвящено разработке алгоритма управления тяговым электродвигателем вентильно-индукторного типа с учетом режимов нагружения.

Проведены расчеты, выполненные для всех режимов тяги электропоезда, для которых наблюдается снижение тепловых потерь за счет изменения углов управления ТЭД. Полученное значение экономии электроэнергии для всего депо за один год работы служит исходным условием для дальнейших экономических расчетов.

Неучтенные факторы, такие как разница потерь на вихревые токи, перемагничивание стали и другие электромагнитные процессы, являющиеся важными составляющими потерь, являются перспективной для совершенствования приведенных в данной статье вычислений.

Библиографический список

1. Авдеев А. С., Осипов О. И. Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3 (52). С. 38–46. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-38-46. EDN: ROMSBX.

2. Yangabc J., Chen J., Yang G. [et al.]. Research on cogging torque characteristics of permanent magnet synchronous machines with the same number of poles and slots // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022. Vol. 561 (6). P. 169730. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169730.

3. Смачный В. Ю. Анализ схем преобразователей, применяемых для питания фаз вентильно-индукторных приводов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 2 (74). С. 100–121. DOI: 10.14498/tech.2022.2.8. EDN: OOOOLCQ.

4. Kashuba A. V., Shevkunova A. V. Reduction of pulsations of the electromagnetic moment of the switched reluctance electric motor // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 461–466. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787213.

5. Miroshnichenko E. E. Effect of the forces of one-way magnetic attraction on the reliability of the bearing unit of the traction switched reluctance motor // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131 (4). P. 042078. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042078. EDN: CQKJOT.

6. Мирошниченко Е. Е. Тяговый вентильно-индукторный двигатель с улучшенными показателями надежности подшипниковых узлов для электрического подвижного состава // Транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7, № 2. С. 97–105. DOI: 10.17816/transsyst20217297-105.

7. Petrushin A., Smachney V., Petrushin D. Research of options for maintaining the operability of the traction switched reluctance motors in emergencies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 950 (1). P. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012028.

8. Shevkunova A., Shevkunov N. Efficiency of the Project for the Production of the Modernized Switched Reluctance Motor // Lecture Notes in Networks and Systemsthis. 2022. Vol. 509. P. 33–42.

9. Buriakovskiy S., Babaiev M., Lubarskiy B. [et al.]. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of hybrid diesel locomotive // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 1/2 (91). P. 68–75. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.122422.

10. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. USA: CRC Press. 2001. 432 p.

11. Bajpai D., Kant Jogi V. Brief History of Switched Reluctance Motor // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). 2018. Vol. 13, Issue 1 Ver. IV. P. 1–25. DOI: 10.9790/1676-1301040125.

12. Демидова Г. Л., Дербиков Я. Д., Петриков Ф. С. [и др.]. Сравнительный анализ методов управления вентильно-индукторной электрической машиной // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 2. С. 390–402. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-390-402. EDN: UKMRRO.

13. Mohanraj G. T., Rahman M. R., Joladarashi Sh. [et al.]. Design and fabrication of optimized magnetic roller for permanent roll magnetic separator (PRMS): Finite element method magnetism (FEMM) approach // Advanced Powder Technology. 2021. Vol. 32 (2). P. 546–564. DOI: 10.1016/j.appt.2021.01.003.

14. Шабанов А. С., Нейман В. Ю. Применение пакетов программ FEMM и Comsol Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей // Современные материалы, техника и технологии. 2017. № 5 (13). С. 96–100. EDN: ZOLHPH. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneni-paketov-programm-femm-i-comsol-multiphysics-v-zadachah-rascheta-lineynyh-elektromagnitnyh-dvigatelay> (дата обращения: 28.04.2023).

15. Прошутинский Р. И., Колодкин О. В. Автоматизация проектирования электромеханического преобразователя вентильного тягового двигателя с помощью современных программных средств // Бюллетень результатов научных исследований. 2016. № 1 (18). С. 72–79. EDN: VPZKMV. URL: <https://>

cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-proektirovaniya-elektromehanicheskogo-preobrazovatelya-ventilnogo-tyagovogo-dvigatelya-s-pomoschyu-sovremennyh (дата обращения: 28.04.2023).

КАШУБА Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону.

SPIN-код: 4086-1671

AuthorID (РИНЦ): 922722

ORCID: 0000-0002-6529-1895

AuthorID (SCOPUS): 57194232715

ResearcherID: CAA-2491-2022

Адрес для переписки: kashuba-av@mail.ru

ШЕВКУНОВА Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

SPIN-код: 9904-0711

AuthorID (РИНЦ): 823538

ORCID: 0000-0002-5508-8367

AuthorID (SCOPUS): 57194232704

ResearcherID: AAI-8866-2021

Адрес для переписки: nastya3051990@mail.ru

Для цитирования

Кашуба А. В., Шевкунова А. В. Построение алгоритма управления с целью повышения энергоэффективности вентильно-индукторного электродвигателя // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 60–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023 г.

© А. В. Кашуба, А. В. Шевкунова

UDC 621.363 + 06

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69

EDN: ZVLMML

A. V. KASHUBA
A. V. SHEVKUNOVA

Rostov State
Transport University,
Rostov-on-Don, Russia

CONSTRUCTION OF THE CONTROL ALGORITHM TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF A SWITCHED RELUCTANCE ELECTRIC MOTOR

An energy-efficient switched reluctance electric drive is considered in relation to electric rolling stock. It fully meets such requirements as good adjustment properties, high energy efficiency and operational reliability. The scientific and technical value of the results of the work lies in the development of an algorithm for controlling a traction switched reluctance motor that reduces the operating current while providing the necessary power. The calculations are made by means of specialized programs interacting with each other FEMM and MATLAB. The materials of this study are of practical value for improving the operational and technical and economic indicators of electric rolling stock.

Keywords: switched reluctance electric motor, algorithm, control angle, optimality, heat loss, current form, electromagnetic moment.

References

1. Avdeyev A. S., Osipov O. I. Identifikatsiya elektricheskikh parametrov sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Electrical parameters identification of permanent magnet synchronous motor] // *Elektrotekhnicheskiye Sistemy i Kompleksy. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021. No. 3 (52). P. 38–46. DOI: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-38-46. EDN: ROMSBX. (In Russ.).

2. Yangabc J., Chen J., Yang G., Zhang C. Research on cogging torque characteristics of permanent magnet synchronous machines with the same number of poles and slots // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. Vol. 561. P. 169730. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169730. (In Engl.).

3. Smachnyy V. Yu. Analiz skhem preobrazovateley, primenyayemykh dlya pitaniya faz ventil'no-induktornykh privodov [Analysis of converter circuits used to power the phases of switched reluctance drives] // *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye Nauki. Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2022. Vol. 30, no. 2 (74). P. 100–121. DOI: 10.14498/tech.2022.2.8. EDN: OOOLCQ. (In Russ.).

4. Kashuba A. V., Shevkunova A. V. Reduction of pulsations of the electromagnetic moment of the switched reluctance electric motor // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2022. P. 461–466. DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787213. (In Engl.).

5. Miroschnichenko E. E. Effect of the forces of one-way magnetic attraction on the reliability of the bearing unit of the traction switched reluctance motor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2131 (4). P. 042078. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042078. EDN: CQKJOT. (In Engl.).
6. Miroschnichenko E. E. Tyagovyy ventil'no-induktorny dvigatel' s uluchshennymi pokazatelyami nadezhnosti podshipnikovyykh uzlov dlya elektricheskogo podvizhnogo sostava [Switched reluctance traction motor with improved indicators of the reliability of bearing units for an electric rolling stock] // *Transportnyye Sistemy i Tekhnologii. Transportation Systems and Technology*. 2021. Vol. 7, no. 2. P. 97–105. DOI: 10.17816/transsy20217297-105. (In Russ.).
7. Petrushin A., Smachney V., Petrushin D. Research of options for maintaining the operability of the traction switched reluctance motors in emergencies // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 950 (1). P. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012028. (In Engl.).
8. Shevkunova A., Shevkunov N. Efficiency of the Project for the Production of the Modernized Switched Reluctance Motor // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 509. P. 33–42. (In Engl.).
9. Buriakovskiy S., Babaiev M., Lubarskiy B. [et al.]. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of hybrid diesel locomotive // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No. 1/2 (91). P. 68–75. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.122422. (In Engl.).
10. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. Florida: CRC Press. 2001. 432 p. (In Engl.).
11. Bajpai D., Kant Jogi V. Brief History of Switched Reluctance Motor // *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 2018. Vol. 13, Issue 1 Ver. IV. P. 1–25. DOI: 10.9790/1676-1301040125. (In Engl.).
12. Demidova G. L., Derbikov Ya. D., Petrikov F. S. [et al.]. Sravnitel'nyy analiz metodov upravleniya ventil'no-induktornoy elektricheskoy mashinoy [Comparative analysis of switched reluctance motor control algorithms] // *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023. Vol. 23, no. 2. P. 390–402. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-390-402. EDN: UKMRRO. (In Russ.).
13. Mohanraj G. T., Rahman M. R., Joladarashi Sh. [et al.]. Design and fabrication of optimized magnetic roller for permanent roll magnetic separator (PRMS): Finite element method magnetics (FEMM) approach // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32 (2). P. 546–564. DOI: 10.1016/j.appt.2021.01.003. (In Engl.).
14. Shabanov A. S., Neyman V. Yu. Primeneniye paketov programm FEMM i Comsol Multiphysics v zadachakh rascheta lineynykh elektromagnitnykh dvigateley [Application of FEMM and Comsol Multiphysics software packages in the calculation of linear electromagnetic motors] // *Sovremennyye Materialy, Tekhnika i Tekhnologii. Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2017. No. 5 (13). P. 96–100. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-paketov-programm-femm-i-comsol-multiphysics-v-zadachah-rascheta-lineynykh-elektromagnitnykh-dvigatelay> (accessed: 28.04.2023). (In Russ.).
15. Proshchinskiy R. I., Kolodkin O. V. Avtomatizatsiya proyektirovaniya elektromekhanicheskogo preobrazovatelya ventil'nogo tyagovogo dvigatelya s pomoshch'yu sovremennykh programmnykh sredstv [Computer aided design of electromechanical transducer of gated traction motor by using modern software] // *Byulleten' Rezul'tatov Nauchnykh Issledovaniy. Bulletin of Scientific Research Results*. 2016. No. 1 (18). P. 72–79. EDN: VPZKMV. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-proektirovaniya-elektromekhanicheskogo-preobrazovatelya-ventilnogo-tyagovogo-dvigatelya-s-pomoschyu-sovremennykh> (accessed: 28.04.2023). (In Russ.).

KASHUBA Aleksandr Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Theoretical Mechanics Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don.
 SPIN-code: 4086-1671
 AuthorID (RSCI): 922722
 ORCID: 0000-0002-6529-1895
 AuthorID (SCOPUS): 57194232715
 ResearcherID: CAA-2491-2022
 Correspondence address: kashuba-av@mail.ru
SHEVKUNOVA Anastasiya Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, RSTU, Rostov-on-Don.
 SPIN-code: 9904-0711
 AuthorID (RSCI): 823538
 ORCID: 0000-0002-5508-8367
 AuthorID (SCOPUS): 57194232704
 ResearcherID: AAI-8866-2021
 Correspondence address: nastya3051990@mail.ru

For citations

Kashuba A. V., Shevkunova A. V. Construction of the control algorithm to improve energy efficiency of a switched reluctance electric motor // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 60–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-60-69.

Received May 02, 2023.

© A. V. Kashuba, A. V. Shevkunova



ВЫСОКОНАДЕЖНЫЙ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Создание условий для применения вентильно-индукторного двигателя в системе тягового электропривода подвижного состава железных дорог за счет повышения надежности работы его подшипников служит основной целью данной научной статьи. Разработка алгоритма, позволяющего проводить расчеты характеристик тягового вентильно-индукторного двигателя на этапах конструирования и производства, учитывающего силы одностороннего магнитного притяжения, является основной задачей исследований. Изучены силы одностороннего магнитного притяжения, возникающие в воздушном зазоре электро-двигателя при двух видах его неравномерности. Отличительная особенность статьи состоит в предложении об ограничении величины силы одностороннего магнитного притяжения величиной силы при предельно допустимом остаточном дисбалансе. По итогам работы получен алгоритм определения характеристик тягового вентильно-индукторного двигателя уникальный в своем роде, позволяющий снизить влияние сил одностороннего магнитного притяжения на подшипники. Заключено, что использование вентильно-индукторного двигателя с длительным сроком службы подшипников в системе тягового электропривода создаст предпосылки для получения нового конкурентоспособного железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: железнодорожный подвижной состав, тяговый вентильно-индукторный электродвигатель, сила одностороннего электромагнитного притяжения, сила дисбаланса, подшипники, надежность.

Введение. Безопасность и стабильность процесса перевозок на железнодорожном транспорте возможна при обеспечении бесперебойной работы такого важного узла, как тяговый электродвигатель (ТЭД). Использование в системе тяги энергоэффективного и надежного ТЭД, обладающего высокой ремонтопригодностью, даст предпосылки для создания принципиально нового и конкурентоспособного подвижного состава.

Применение вентильно-индукторного двигателя (ВИД) в составе тягового электропривода железнодорожного подвижного состава довольно перспективно, на что указывает ряд его преимуществ. Так, ВИД прост при изготовлении, ремонтопригоден и надежен, имеет высокое значение КПД, возможность работы при высоких температурах и в агрессивных средах (при условии герметизации ротора). Помимо этого, данный тип двигателя обладает оптимальной для тягового электропривода естественной механической характеристикой. Затраты на производство ВИД значительно ниже аналогичных затрат на производство традиционных ТЭД в связи с невысокой стоимостью их материалов. Известны примеры практического использования вентильно-индукторных электрических машин (ВИМ) большой

мощности, превышающей 500 кВт [1, 2]. Имеются разработки, связанные с применением ВИМ в составе электропривода транспортных средств, в том числе подвижного состава железных дорог [3].

Высокий уровень шума и вибраций, а также износ подшипниковых узлов (ПУ) — основные недостатки данного типа электрических машин, препятствующие их серийному производству и широкому применению [4, 5]. Практика эксплуатации ВИМ общепромышленного назначения показывает, что их «слабым местом» является подшипниковый узел. Так, из 100 двухфазных ВИД мощностью 2,2 кВт, предназначенных для приводов насосов горячего водоснабжения, все вышли из строя спустя год работы по причине отказа подшипников. Другим примером является ВИД привода шаровой мельницы, мощность которого соответствовала 1,2 МВт. Период работы данного экземпляра составил 9 месяцев, а выход из строя также был обусловлен отказом подшипников [6].

Следовательно, цель данной научной статьи состоит в создании условий для применения ВИД в системе тягового электропривода подвижного состава за счет повышения надежности работы его подшипников.

Для того, чтобы ВИД имел высокие энергетические показатели, при проектировании величину зазора стремятся минимизировать. Однако на производстве, в связи с невозможностью абсолютно точного изготовления деталей электрической машины, а также наличием погрешностей при сборке, в том числе отклонений при размещении ротора, имеется неравномерность воздушного зазора. Тогда, вследствие данной неравномерности, происходит возникновение сил одностороннего магнитного притяжения (ОМП) в зазоре между статором и ротором электрической машины. Под воздействием данных сил скорость износа подшипников возрастает, увеличиваются шум и вибрации.

Исследованию сил ОМП в ВИМ, а также поиску способов и средств по уменьшению их влияния посвящены научные труды российских и зарубежных ученых. Все они направлены либо на совершенствование и оптимизацию конструкции ВИМ, либо системы управления.

Имеется достаточный объем публикаций, где представлены различные варианты конструкции статора и ротора. Так, эффективным способом снижения сил ОМП, а следовательно, и вибрации, является использование статора с перекосом в конструкции ВИМ [7]. Снизить влияние сил ОМП позволяет конструкция ВИМ, содержащего двойной статор [8].

Подход, связанный с совершенствованием технологии систем управления, проще в реализации. Так, в [9, 10] представлен способ контроля силы ОМП путем независимого управления полюсными токами. Здесь для получения уменьшенной величины силы ОМП предложена схема возбуждения фазы синусоидальным током. Недостатком данного способа является использование большого числа переключателей питания, что, в свою очередь, снижает эффективность всей системы, а также увеличивает ее стоимость.

Снизить значение сил ОМП, вызывающих вибрацию и износ подшипников, в [11, 12] предлагается путем применения двухступенчатой коммутации. Также управлять величиной силы ОМП в ВИМ возможно за счет использования так называемого «гибридного возбуждения» [13], особенностью которого является наличие дополнительной обмотки левитации.

Основная часть. Задача исследований, представленных в данной работе, состоит в разработке алгоритма расчета параметров и характеристик тяговых ВИД, позволяющего совершенствовать их технологию изготовления, повысить надежность подшипников и улучшить виброакустические показатели. При этом необходимо провести исследования сил ОМП, возникающих в воздушном зазоре при его неравномерности, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на подшипники электрической машины.

В качестве объекта исследования был выбран ВИД, магнитная система которого (рис. 1) спроектирована в корпусе электродвигателя типа ДТА-1200А, предназначенного для тягового привода электроваза двойного питания ЭП20. В номинальном одноимпульсном режиме работы тяговый ВИД имеет следующие параметры: мощность на валу $P_{ном} = 1300$ кВт; напряжение составляет $U_d = 2200$ В; частота вращения принята $n_{ном} = 1766$ об/мин.

Перед тем как проводить расчеты, необходимо принять ряд ограничений и допущений: магнитное поле в электрической машине плоскопараллельно

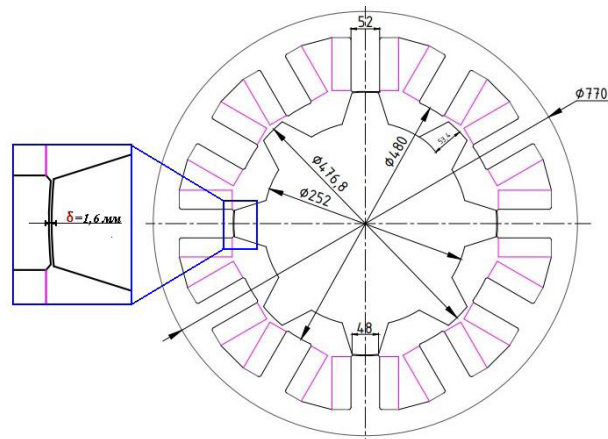


Рис. 1. Конфигурация магнитной системы тягового ВИД

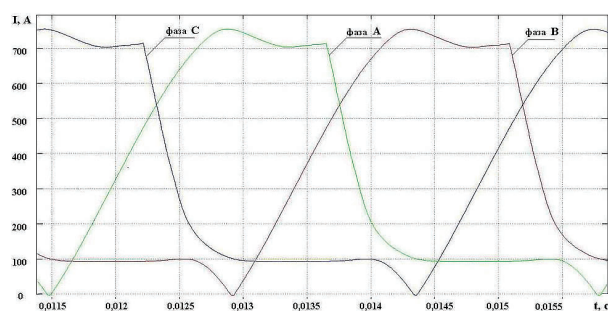


Рис. 2. Фазные токи обмотки тягового ВИД

и отсутствует за его пределами; не ведется учет взаимного влияния фаз; распределение магнитной индукции не находится в существенной зависимости от гистерезиса и вихревых токов; постоянными в воздушном зазоре являются значения величины неравномерности, а также температуры.

Неравномерность зазора тягового ВИД может иметь различный характер и проявляться по причинам, связанным с изготовлением элементов его конструкции, а также в процессе эксплуатации. Поэтому, остановимся на исследовании двух идеализированных видов смещения ротора тягового ВИД. Первый вид заключается в смещении ротора и вращении относительно его оси симметрии. Второй — происходит смещении ротора и вращение уже относительно оси симметрии статора. Значение величины смещения по осям X и Y декартовой системы координат примем равным 0,4 мм [14].

Нахождение сил ОМП при заданном смещении происходит в определенной последовательности. Вначале для расчетов используется метод конечных элементов. Представленный метод дает возможность определить матрицу потокоцепления $\psi = f(i, \theta)$ для фазы тягового ВИД при выше принятых допущениях (рис. 1). Затем с использованием матрицы потокоцепления в программе MATLAB (SIMULINK) определяются фазные токи в зависимости от момента времени $i(t)$, данные на рис. 2. Далее, в программе FEMM происходит расчет сил ОМП и электромагнитного момента при заданной неравномерности, используются при этом фазные токи в зависимости от углового положения в формате $i(\theta)$ (рис. 3).

На рис. 3 даны результаты расчета сил ОМП и момента на валу тягового ВИД для случая, когда ось вращения перемещается вместе с осью симме-

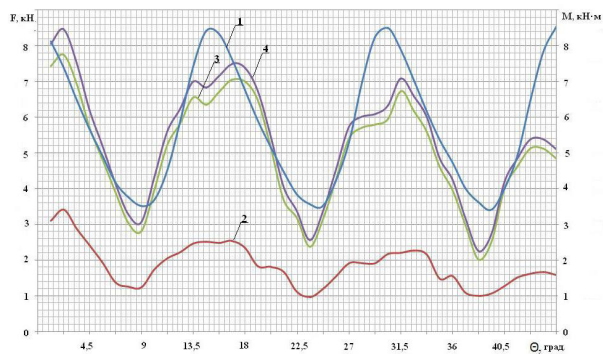


Рис. 3. Характеристики тягового ВИД со смещением ротора и вращением относительно его оси: 1 — электромагнитный момент; 2, 3 — силы ОМП по осям X и Y; 4 — результирующая сила ОМП (значение по модулю)

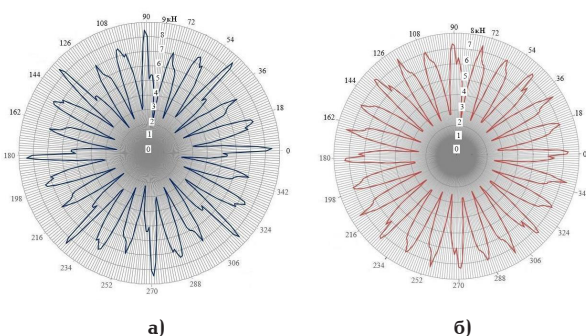


Рис. 4. Результирующая сила ОМП в полярной системе координат при смещении ротора, вращающегося относительно оси симметрии: а) ротора; б) статора

трии смещенного ротора по осям X и Y на 0,4 мм. Так, величина силы ОМП по оси X на интервале от рассогласованного к согласованному положению уменьшается, но в незначительной степени. Иначе ведет себя составляющая силы ОМП по оси Y и, соответственно, результирующее значение сил ОМП. Их величины значительно изменяются на всем рассматриваемом интервале. Максимальные значения результирующей силы приходятся как раз на завершение периода коммутации фазы.

На рис. 4а найденные значения результирующей силы ОМП (в кН), для наглядности, изображаем в полярной системе координат. Такие же расчеты были проведены для второго варианта неравномерности зазора, когда вращение смещенного ротора осуществляется относительно оси симметрии статора. Значения результирующей силы ОМП (в кН) для данного случая в полярной системе координат показаны на рис. 4б.

В первом случае (рис. 4а) величина смещения будет зависеть от допусков на изготовление элементов конструкции тягового ВИД. Второй случай смещения (рис. 4б) связан с зазором в подшипнике, возрастающим постепенно в связи с износом элементов подшипника. Из рис. 4 следует, что первый случай смещения ротора, вращающегося относительно его оси вращения, является худшим по отношению ко второму и приводит к возрастающему износу подшипников и их выходу из строя.

Под воздействием сил ОМП растет неравномерность воздушного зазора, а также создаются динамические усилия, влияющие на подшипники тягового ВИД. Аналогичное воздействие на подшип-

ники оказывают силы дисбаланса. Хотя силы дисбаланса и силы ОМП имеют разное происхождение характер их действия на подшипники один. Предположим, что возможно ограничить амплитудное значение силы ОМП допустимой силой дисбаланса. Известен ГОСТ ИСО 1940-1-2007, позволяющий регламентировать силу дисбаланса, в котором описывается методика определения силы, приложенной к подшипнику при остаточном дисбалансе.

Обозначим силу при предельно допустимом остаточном дисбалансе F . Тогда, согласно предположению, сделанному выше, допустимая сила ОМП ($F_{\text{ОМП}}$) соответствует равенству $F_{\text{ОМП}} = F$. Далее подбираем класс точности балансировки.

Для тягового ВИД (рис. 1) класс точности балансировки соответствует G 2,5 по ГОСТ ИСО 1940-1-2007 [15]

$$e_{\text{per}} \cdot \omega = 2,5 \text{ мм/с.}$$

Тогда, значение допустимого остаточного дисбаланса определяется:

$$U_{\text{per}} = 1000 \frac{(e_{\text{per}} \cdot \omega) \cdot m}{\omega},$$

где ω — угловая частота вращения, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$;
 m — масса ротора тягового ВИД, $m = 415 \text{ кг}$.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1766}{30} = 184,84 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$U_{\text{per}} = 1000 \frac{2,5 \cdot 415}{184,84} =$$

$$= 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{мм} = 5,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, сила при предельно допустимом остаточном дисбалансе:

$$F = U_{\text{per}} \cdot \omega,$$

$$F = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 184,84^2 = 191,3 \text{ Н}.$$

Значит, допустимая величина силы ОМП:

$$F_{\text{ОМП}} = F = 191,3 \text{ Н}.$$

По результатам, представленным на рис. 3 и рис. 4, можно заключить, что значения сил, полученных расчетным путем, намного превышают их допустимые значения. Тогда важно проработать особенности производственного процесса тягового ВИД для получения на выходе электрических машин с равномерным воздушным зазором.

Для получения тягового ВИД с равномерным воздушным зазором далее в работе приведен алгоритм, позволяющий рассчитывать характеристики электрической машины на этапах конструирования и производства, при этом ведется учет сил ОМП (рис. 5).

Особенность предложенного в работе алгоритма заключается в том, что он нацелен на решение задач, связанных с производственным процессом тяговых ВИД.

Новизна данного алгоритма состоит в его особых блоках. Наличие блока, где происходит определение направления смещения ротора в сторону действия силы тяжести, является его особенностью. На этом этапе проверяется вся размерная цепь путем анализа информации о допусках,

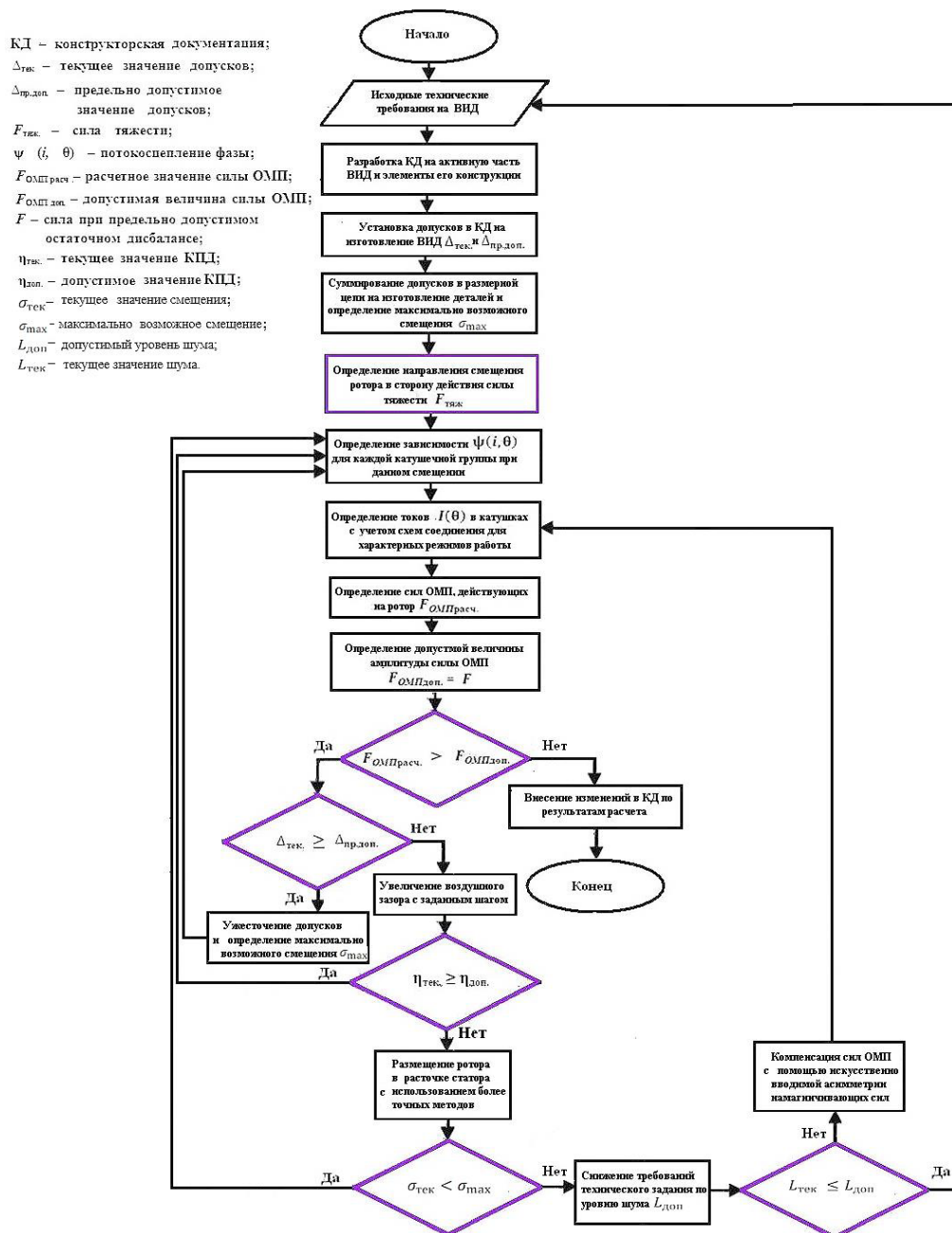


Рис. 5. Алгоритм определения характеристик тягового ВИД

указанных в конструкторской документации (КД), а затем определяется наиболее неблагоприятный вариант сборки тягового ВИД (случай, при котором ротор перемещается в сторону действия силы тяжести).

Следующая особенность алгоритма заключается в блоке, позволяющем судить о влиянии полученных расчетных значений сил ОМП на период эксплуатации тягового ВИД. На данном этапе предлагается производить сравнение расчетной силы ОМП с амплитудным значением силы, оказывающей влияние на ПУ при остаточном дисбалансе [16]. Так, известен ГОСТ ИСО 1940-1-2007, который позволяет регламентировать силу дисбаланса [15]. Из него заключено, что, если сила дисбаланса не будет превышать допустимую величину, тогда тяговый ВИД будет находиться в работоспособном состоянии достаточно длительный период времени.

Данный алгоритм итеративен. Так, в случае если значение сил ОМП не соответствует требуемым условиям, следует установить более жесткие требова-

ния, а затем проводить процедуру итерации, пока значение сил ОМП, полученных расчетным путем, не будет соответствовать условию:

$$F_{\text{ОМП расч.}} \leq F_{\text{ОМП доп.}} \quad (1)$$

где $F_{\text{ОМП расч.}}$ — расчетное значение сил ОМП;
 $F_{\text{ОМП доп.}}$ — допустимое значение сил ОМП.

Если данное условие не выполняется, происходит переход к следующему блоку (рис. 5).

В нем сравниваются текущее и предельно допустимое значения допусков на элементы конструкции. Если условие

$$\Delta_{\text{тек}} \geq \Delta_{\text{пр.доп.}} \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{тек}}$ — текущее значение допусков; $\Delta_{\text{пр.доп}}$ — предельно допустимое значение допусков выполняется, то следует ужесточать допуски и определять максимально возможное смещение. Далее процесс повторяется (рис. 5).

В случае невыполнения условия (2), когда отсутствует возможность ужесточения допусков по производственным причинам, следует увеличивать воздушный зазор с определенным шагом между ротором и статором тягового ВИД. Обратной стороной данных действий является уменьшение КПД электрической машины. При выполнении условия

$$\eta_{\text{тек.}} \geq \eta_{\text{доп.}} \quad (3)$$

где $\eta_{\text{тек.}}$ — текущее значение КПД; $\eta_{\text{доп.}}$ — допустимое значение КПД, для тягового ВИД с увеличенным воздушным зазором весь алгоритм необходимо пройти заново, пока условие (1) не выполнится.

В случае невыполнения условия (3), согласно представленному алгоритму, имеются три варианта дальнейших действий. Во-первых, возможно изменять требования по уровню КПД в сторону его уменьшения, если это устраивает сторону заказчика. Во-вторых, использовать методы, позволяющие как можно точнее разместить ротор в расточке статора тягового ВИД [17]. В-третьих, произвести компенсацию сил ОМП, используя вводимую искусственным способом асимметрию намагничивающих сил [15, 16].

Заключение. Предложенный в работе алгоритм уникален в своем роде. Он позволяет контролировать точность изготовления элементов конструкции тягового ВИД и обеспечивать равномерность воздушного зазора путем внесения изменений в технологический цикл на производстве. Это даст возможность снизить влияние сил ОМП на подшипники, повысив их надежность.

Использование ВИД, имеющего длительный срок службы подшипников, в системе тягового привода создаст предпосылки для создания нового конкурентоспособного железнодорожного подвижного состава.

Библиографический список

1. Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М. Вентильно-индукторный привод ВИП-1000-1100 в системе электродвижения // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала Макарова. 2019. Т. 11, № 3. С. 573–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.
2. Темиров А. П., Нгуен К. К. Исследование вентильно-индукторного двигателя большой мощности двухпакетной конструкции для пульповых насосов ГРАТ-1800/67 горнорудного оборудования // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 1. С. 54–62.
3. Никифоров Н. В., Пахомин С. А., Птах Г. К. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов // Электричество. 2007. № 2. С. 34–38.
4. Fang G., Scalcon F. P., Xiao D. [et al.] Advance control of switched reluctance motors (SRMs): a review on current regulation, torque control and vibration suppression // IEEE Open Journal of Industrial Electronics Society. 2021. № 2. P. 280–301. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3076807.
5. Бруслиновский Б. В., Евтодий А. А. Снижение шума вентильно-индукторного двигателя при широтно-импульсном управлении со случайным изменением параметров // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 8. С. 38–46.
6. Анучин А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 2018. 445 с.
7. Chun G., Jianhua W., Mengjie S. [et al]. Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase

Switched Reluctance Motors // IEEE Transactions on Magnetic. 2015. Vol. 51, № 9. P. 1–9. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2441035.

8. Isfahani A. H., Fahimi B. Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine // IEEE Transactions on Magnetic. 2014. Vol. 50, № 2. P. 293–296. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2286569.

9. Lin F.-C., Yang S.-M. Analysis and modeling of the radial force in a switched reluctance motor with sinusoidal excitations // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2003. Vol. 2. P. 938–943. DOI: 10.1109/PEDS.2003.1283094.

10. Lin F.-C., Yang S.-M. Instantaneous Shaft Radial Force Control with Sinusoidal Excitations for Switched Reluctance Motors // Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Seattle. WA. USA. 2004. P. 424–430. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348442.

11. Zhu Z. Q., Liu X., Pan Z. Analytical model for predicting maximum reduction levels of vibration and noise in switched reluctance machine by active vibration cancellation // IEEE Trans. Energy Convers. 2011. Vol. 26, № 1. P. 36–45. DOI: 10.1109/TEC.2010.2087336.

12. Makino H., Kosaka T., Matsui N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, № 6. P. 4521–4530. DOI: 10.1109/TIA.2015.2448065.

13. Cao X., Deng Z., Yang G. [et al.] Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, № 5. P. 1376–1385. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2016568.

14. ГОСТ 24810-2013. Подшипники качения. Внутренние зазоры. Введ. 2015–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.

15. ГОСТ ИСО1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. Введ. 2008–07–01. Москва: Стандартинформ. 2008. 27 с.

16. Глинкин С. А., Захаров А. В. Опыт конструирования и освоения производства опытно-промышленной партии вентильно-индукторных двигателей // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 14–19.

17. Мирошниченко Е. Е. Оценка влияния сил одностроннего магнитного притяжения на надежность подшипникового узла вентильно-индукторной электрической машины // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22, № 3. С. 39–51. DOI: 10.14529/power220305.

МИРОШНИЧЕНКО Екатерина Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону. SPIN-код: 1498-5371

AuthorID (PIHCL): 1097933

ORCID: 0000-0002-8883-8021

AuthorID (SCOPUS): 56584045300

Адрес для переписки: ekaterinailjasova@rambler.ru

Для цитирования

Мирошниченко Е. Е. Высоконадежный вентильно-индукторный двигатель для системы тягового электропривода железнодорожного подвижного состава // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 70–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-70-76.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023 г.

© Е. Е. Мирошниченко

HIGHLY RELIABLE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR THE TRACTION ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF RAILWAY ROLLING STOCK

The main purpose of this work is to create conditions for the use of switched reluctance motor in the traction electric drive system of rolling stock by increasing the reliability of its bearings. The object of the study is the traction switched reluctance motor. The task has been set, which consists in developing an algorithm that allows to calculate the characteristics of the traction switched reluctance motor at the stages of design and production, taking into account the forces of a one-way magnetic attraction. The forces of one-way magnetic attraction, arising in the air gap of the electric motor with two types of its non-uniformity are studied. A proposal has been made to limit the force of the one-way magnetic attraction to a force at a permissible residual imbalance. As a result, an algorithm for determining the characteristics of the traction switched reluctance motor is unique in its kind, which makes it possible to reduce the effect of forces of the one-way magnetic attraction on bearings. The use of switched reluctance motor with a long service life of bearings in the traction drive system will make it possible to obtain a new competitive rolling stock.

Keywords: railway rolling stock, traction switched reluctance electric motor, force of a one-way magnetic attraction, unbalance force, bearings, reliability.

References

1. Romanovskiy V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Ventil'no-indukturnyy privod VIP-1000-1100 v sisteme elektrodvizheniya [Switched reluctance drive SRD-1000-1100 in the electromotive systems] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala Makarova. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral Makarov*. 2019. Vol. 11, no 3. P. 573–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581. (In Russ.).
2. Temirev A. P., Nguyen K. K. Issledovaniye ventil'no-indukturnogo dvigatelya bol'shoy moshchnosti dvukhpaketnoy konstruktssii dlya pul'povykh nasosov GRAT-1800/67 gornorudnogo oborudovaniya [Research of the high power two-package switched reluctance motor for pulp pumps GRAT-1800/67 of a mining equipment] // Izvestiya SPbGETU «LETI». *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2017. No. 1. P. 54–62. (In Russ.).
3. Nikiforov N. V., Pakhomin S. A., Ptakh G. K. Ventil'no-indukturnyye dvigateli dlya tyagovykh elektropriwodov [Switched reluctance motor for traction electric drives] // *Elektrichestvo. Electricity*. 2007. No. 2. P. 34–38. (In Russ.).
4. Fang G., Scalcon F. P., Xiao D. [et al.] Advance control of switched reluctance motors (SRMs): a review on current regulation, torque control and vibration suppression // *IEEE Open Journal of Industrial Electronics Society*. 2021. № 2. P. 280–301. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3076807. (In Engl.).
5. Bruslinovskiy B. V., Evtodiy A. A. Snizheniye shchuma ventil'no-indukturnogo dvigatelya pri shirotno-impul'snom upravlenii so sluchaynym izmeneniyem parametrov [Acoustic noise reduction in the switched reluctance motors using the pulse-width modulation with the random switching strategy] // *Izvestiya SPbGETU «LETI». Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2015. No 8. P. 38–46. (In Russ.).
6. Anuchin A. S. Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv [Development of digital systems for effective control of traction electrical equipment for hybrid electric vehicles]. Moscow, 2018. 445 p. (In Russ.).
7. Chun G., Jianhua W., Mengjie S. [et al.] Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors // *IEEE Transactions on Magnetic*. 2015. Vol. 51, no. 9. P. 1–9. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2441035. (In Engl.).
8. Isfahani A. H., Fahimi B. Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine // *IEEE Transactions on Magnetic*. 2014. Vol. 50, no. 2. P. 293–296. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2286569. (In Engl.).
9. Lin F.-C., Yang S.-M. Analysis and modeling of the radial force in a switched reluctance motor with sinusoidal excitations // *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. 2003. Vol. 2. P. 938–943. DOI: 10.1109/PEDS.2003.1283094. (In Engl.).
10. Lin F.-C., Yang S.-M. Instantaneous Shaft Radial Force Control with Sinusoidal Excitations for Switched Reluctance Motors // *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*. Seattle. WA. USA. 2004. P. 424–430. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348442. (In Engl.).
11. Zhu Z. Q., Liu X., Pan Z. Analytical model for predicting maximum reduction levels of vibration and noise in switched reluctance machine by active vibration cancellation // *IEEE Trans.*

Energy Convers. 2011. Vol. 26, no. 1. P. 36–45. DOI: 0.1109/TEC.2010.2087336. (In Engl.).

12. Makino H., Kosaka T., Matsui N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, no. 6. P. 4521–4530. DOI: 10.1109/TIA.2015.2448065. (In Engl.).

13. Cao X., Deng Z., Yang G. [et al.] Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, no. 5. P. 1376–1385. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2016568. (In Engl.).

14. GOST 24810-2013. Podshipniki kacheniya. Vnutrenniye zazory [Rolling bearings. Internal clearances]. Moscow, 2014. 19 p. (In Russ.).

15. GOST ISO 1940-1-2007. Vibratsiya. Trebovaniya k kachestvu balansirovki zhestkikh rotorov. Chast' 1. Opredeleniye dopustimogo disbalansa [Vibration. Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state. Part 1. Specification and verification of balance tolerances]. Moscow, 2008. 27 p. (In Russ.).

16. Glinkin S. A., Zakharov A. V. Opyt konstruirovaniya i osvoyeniya proizvodstva opytно-promyshlennoy partii ventil'no-indukturnykh dvigateley [Experience of designing and mastering the production of a pilot-batch of switched-reluctance motors] // Vestnik IGEU. Vestnik ISPEU. 2015. No. 1. P. 14–19. (In Russ.).

17. Miroshnichenko E. E. Otsenka vliyaniya sil odnostoronnego magnitnogo prityazheniya na nadezhnost' podshipnikovogo uzla ventil'no-indukturnoy elektricheskoy mashiny [Assessing the

influence of one-way magnetic attraction forces on the reliability of the bearing unit of a switched reluctance electric machine] // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 39–51. DOI: 10.14529/power220305. (In Russ.).

MIROSHNICHENKO

Ekaterina

Evgenievna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Traction Rolling Stock Department, Rostov State Transport University of Communications, Rostov-on-Don.

SPIN-code: 1498-5371

AuthorID (RSCI): 1097933

ORCID: 0000-0002-8883-8021

AuthorID (SCOPUS): 56584045300

Correspondence address: ekaterinailjasova@rambler.ru

For citations

Miroshnichenko E. E. Highly reliable switched reluctance motor for the traction electric drive system of railway rolling stock // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 70–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-70-76.

Received May 02, 2023.

© E. E. Miroshnichenko

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ СТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Дается оценка влияния параметров контролируемой детали магнитным методом неразрушающего контроля на градиент напряженности магнитного поля измерительного преобразователя. Приведена упрощенная конструкция импульсного градиентометрического преобразователя, указаны его параметры для проведения экспериментов. Рассмотрена математическая модель расчета выходного сигнала феррозонда градиентометра, применяемая для получения выходных данных. Исследованы зависимости градиента напряженности магнитного поля от расстояния между датчиком и плоскостью контролируемой детали, от коэрцитивной силы и толщины упрочненного слоя, а также от толщины контролируемой детали. Получены выводы на основании проведенного эксперимента.

Ключевые слова: градиент магнитного поля, напряженность, феррозонд, виброударное упрочнение, неразрушающий контроль, коэрцитивная сила.

Введение. Импульсный магнитный метод контроля механических свойств сталей [1–3] широко используется в практике неразрушающего контроля как в нашей стране, так и за рубежом.

При импульсном магнитном методе изделие намагничивается аксиально симметричным импульсным магнитным полем, направленным перпендикулярно к испытываемой поверхности изделия, повышающим коэрцитивную силу изделия. Затем, после окончания релаксационных процессов, измеряется нормальная составляющая градиента поля остаточной намагниченности, по ее величине судят о значении контролируемого параметра. Для хорошей повторяемости результатов измерений намагничивания производится серией импульсов или после намагничивания импульсным методом производится частичное размагничивание локальной области.

Также в промышленном производстве особое внимание уделяется основополагающим задачам по ресурсосбережению [4], которые необходимо соблюдать при использовании данного вида неразрушающего контроля.

Упрощенная конструкция измерительного импульсного преобразователя показана на рис. 1.

Измерительный преобразователь представляет собой катушку круглого цилиндрического сечения 2, расположенную над контролируемой деталью 1.

Внутри катушки находятся два полуэлемента феррозонда 3, включенные встречно, то есть по градиентометрической схеме. В обмотку катушки подаются импульсы тока амплитудой $0,2 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3$ А, которые создают у торца катушки поле амплитудой $H = 0,1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$ А/м [5].

Длительность импульсов тока обычно равна 100–2000 мкс. Подается несколько импульсов. Намагниченный под катушкой участок создает поле рассеяния, градиент которого ΔH измеряется феррозондом. Величина градиента поля зависит от амплитуды, длительности и количества намагничивающих импульсов, от толщины промагничиваемого слоя металла, от магнитной силы, а также от геометрических параметров намагничивающей катушки [6].

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное обоснование зависимости градиента напряженности магнитного поля от толщины упрочненного слоя и количество упрочненных слоев различной стали.

Модель расчета. Если линейные размеры детали в 3–4 раза превышают размеры катушки измерительного преобразователя, то расчет выходного сигнала можно осуществить по упрощенной методике [7, 8].

Рассчитывается напряженность магнитного поля, создаваемая катушкой с током, по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{H}(\rho_M, z_M) = & \bar{I}_p \sum_{k=1}^m \frac{\delta_k}{2\pi} \int_0^\pi r_k \left(\frac{1}{\sqrt{(z_M - z_2)^2 + b_k^2}} - \frac{z_1 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_1)^2 + b_k^2}} \right) \cos \alpha d\alpha + \\ & + \bar{I}_p \sum_{k=1}^m \frac{\delta_k}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r_k - \rho_M \cos \alpha}{b_k} \left(\frac{z_2 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_2)^2 + b_k^2}} - \frac{z_1 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_1)^2 + b_k^2}} \right) d\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $r_k = \sqrt{r_k^2 + \rho_M^2 - 2r_k \rho}$;

$$\delta_k = \frac{2Iw}{m(z_2 - z_1)(\mu + 1)};$$

μ — магнитная проницаемость ферромагнетика;

M — число бесконечно тонких цилиндров, кото-

рые выбираются их условия $\frac{r_2 - r_1}{m(r_2 + r_1)} \leq 0,1$.

Определяется модуль напряженности магнитного поля:

$$\bar{H}(\rho_M, z_M) = \sqrt{(H_p(\rho_M, z_M))^2 + (H_c(\rho_M, z_M))^2} \quad (2)$$

Намагниченность определяется следующим образом:

$$M = \frac{M_H \cdot M_{rs}}{M_s}, \quad (3)$$

где M_H рассчитывается по формуле [9]:

$$\begin{aligned} M_H = & \chi_H \frac{H_{CS} H}{H^2 + H_{CS}} + \frac{M_s}{\pi} \cdot \frac{H^2}{(H^2 + kH_{CS}^2)} \times \\ & \times \left(\arctg \frac{H_{CS} + H}{H_0} - \arctg \frac{H_{CS} - H}{H_0} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } H_0 = \frac{H_{CS}}{\operatorname{tg} \left(\frac{M_{rs}}{M_s} \cdot \frac{\pi}{2} \right)};$$

$$k = \frac{M_s}{\pi} \cdot \frac{\arctg \left(2 \frac{H_{CS}}{H_0} \right)}{M_C - \chi_H H_{CS} / 2} - 1;$$

χ_H — начальная восприимчивость ($\chi_H = \operatorname{tg} \alpha$);

M_s — намагниченность насыщения;

M_{rs} — остаточная намагниченность;

H_{CS} — коэрцитивная сила по предельной петле гистерезиса;

M_C — величина намагниченность, соответствующая точке на кривой намагниченность при напряженности поля H_{CS} ;

H — напряженность поля, созданного катушкой.

В ферромагнитном пространстве выделяется область, для которой соответствует $H < H_R$ (H_R — напряженность границы области Релея). Эта область разбивается на элементарные области, представляющие собой кольца. Количество колец по координате ρ — T , количество слоев по координате z — F .

Элементарный объем (ЭО) равен:

$$\Delta V_j = 4\pi \cdot \Delta R_{vf}^2 \cdot \Delta z_{vf}; \quad V = \bar{1}, \bar{T}; \quad f = \bar{1}, \bar{F},$$

здесь R_{vf} — ширина v -го слоя, f -го кольца;

Δz_{vf} — толщина, ширина v -го слоя, f -го кольца (рис. 2).

Рассчитываются составляющие вектора намагниченности для j -го ЭО.

$$M_{pj} = M_j \frac{H_{pj}}{H_j}; \quad M_j = M_j \frac{H_{zj}}{H_j}. \quad (5)$$

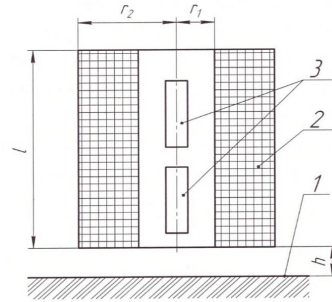


Рис. 1. Упрощенная конструкция импульсного градиентометрического преобразователя

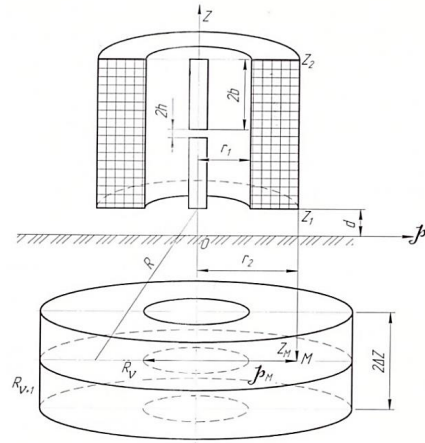


Рис. 2. К расчету выходного сигнала феррозонда

Напряженность магнитного поля в сердечник H_ϕ феррозонда рассчитывается с помощью теоремы о взаимности, которая записывается следующим образом:

$$H_\phi = \frac{1}{Iw\mu_c S_\phi} \int_V \bar{H}(\rho) \bar{M}(\rho) dV. \quad (6)$$

В первом приближении формула (5) имеет вид:

$$H_\phi \approx \frac{1}{Iw\mu_c S_\phi} \sum_{j=1}^N \bar{H}_j \cdot \bar{M}_j \cdot \Delta V_j, \quad (7)$$

где ΔV_j — объем j -го ЭО;

N — количество ЭО;

μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника.

Считается, что сердечники феррозонда имеют круглое сечение и расположены на оси катушки (рис. 3); магнитное поле имеет осевую симметрию, поэтому переписывается (7) так:

$$H_\phi = \frac{1}{Iw\mu_c S_\phi} \sum_{v=1}^T \sum_{f=1}^F \bar{H}_{vf} \cdot \bar{M}_{vf} \cdot \Delta V_{vf}. \quad (8)$$

Магнитное поле, создаваемое сердечником феррозонда с обмоткой w , по которой протекает ток I , можно аппроксимировать полем двух разноименных, но одинаковых по численному значению магнитных зарядов.

Напряженность этого поля равна

$$\bar{H} = \frac{Iw\mu_c}{4 \cdot 2b} a^2 \cdot \frac{1}{R^2} \bar{1}_k, \quad (9)$$

где a — радиус сердечника феррозонда;

$2b$ — длина сердечника феррозонда.

Следовательно, в геометрических центрах сечения колец ферромагнитного материала составляющие вектора H будут иметь вид:

$$H_{pvf} = \frac{Iw\mu_c a^2}{8b} \left[\frac{R_{vf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \frac{R_{vf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} \right];$$

$$H_{zvf} = \frac{Iw\mu_c a^2}{8b} \left[\frac{d + z_{vf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \frac{d + 2b + z_{vf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, напряженность магнитного поля, наведенного намагниченной локальной областью, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$H_{pvf} = \frac{a^2}{8bS_\Phi} \sum_{v=1}^T \sum_{f=1}^F \left(\frac{R_{vf} M_{pvf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \frac{R_{vf} M_{pvf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} + \frac{(d + z_{vf}) M_{pvf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \frac{(d + 2b + z_{vf}) M_{pvf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} \right) \Delta V_{vf}. \quad (11)$$

По формуле (11) рассчитывается напряжённость магнитного поля во втором полуэлементе феррозонда, только d изменяется на $d' = d + 2b + 2h$, где $2h$ — расстояние между двумя полуэлементами феррозонда (рис. 1).

Выходная напряженность рассчитывается по следующей формуле:

$$U_{m2} = G(H_{\Phi 1} - H_{\Phi 2}), \quad (12)$$

где G — функция преобразования феррозонда;

$H_{\Phi 1}, H_{\Phi 2}$ — напряженность в первом и во втором полуэлементах феррозонда.

Функция преобразования феррозонда представляется следующей формулой [10]:

$$G = \frac{8}{\pi} \omega S w_2 \mu_0 \mu_c, \quad (13)$$

где S — площадь сечения сердечника феррозонда;

ω — угловая частота возбуждения;

w_2 — число витков выходной области феррозонда;

μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника феррозонда.

Величина G для феррозондов, используемых в градиентометрах с размерами сердечников $12 \times 20,025$ мм, находится в пределах $2,5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2} \frac{B}{A/M}$.

Результаты экспериментов. Для проведения эксперимента использовалась катушка без экрана высотой $Z_k = 35$ мм с внутренним радиусом $\rho_1 =$

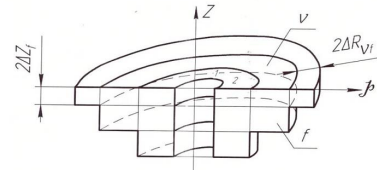


Рис. 3. Разбиение области под катушкой на элементарные объемы

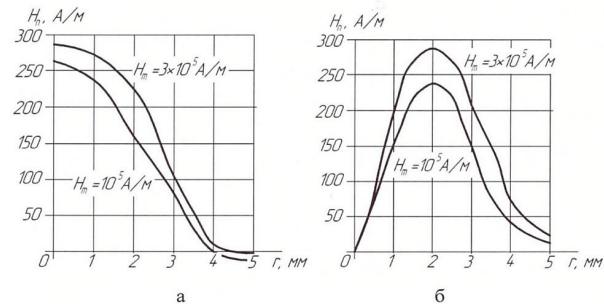


Рис. 4. Зависимость нормальной и касательной составляющих напряженности намагниченной локальной области от координаты r

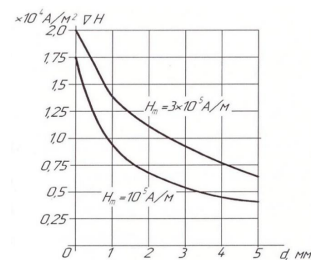


Рис. 5. Зависимость градиента вертикальной составляющей магнитного поля от зазора между датчиком и плоскостью контролируемого изделия (40X)

$= 6$ мм и внешним радиусом $\rho_2 = 12$ мм. Число витков катушки $W = 350$, индуктивность катушки $L = 0,6$ мГн. В статье [5] используется большее количество витков, т.к. имеется различие в материале и сечении проводников. В обмотку катушки подавался импульс тока, который создавал магнитную напряженность поля $3 \cdot 10^5$ А. Длительность импульса считается достаточной для полного намагничивания металла.

На рис. 4 показана зависимость нормальной (рис. 4а) и касательной (рис. 4б) составляющих напряженности поля от координаты r для различных значений амплитуды импульса намагничивающего поля для стали 40X.

Зависимость градиента напряженности магнитного поля от расстояния между датчиком и плоскостью контролируемой детали показана на рис. 5.

Максимальное значение градиента рассчитывалось при различных значениях толщины упрочняемого слоя для стали 20 и 40X, результаты расчета приведены в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что имеется функциональная зависимость градиента напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области от коэрцитивной силы и более слабая зависимость градиента



Таблица 1

Зависимость градиента магнитного поля намагниченной локальной области от коэрцитивной силы и толщины упрочненного слоя

Материал и его коэрцитивная сила до и после обработки	Толщина упрочненного слоя, мм					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
	Градиент поля ∇H , А/м ²					
Сталь 20 $H_{C \min} = 450$ А/м ² $H_{C \max} = 560$ А/м ²	$2,4 \cdot 10^4$ $3,0 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$ $3,5 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$ $3,9 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$ $4,2 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$ $4,4 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$ $4,4 \cdot 10^4$
Сталь 65Г $H_{C \min} = 810$ А/м ² $H_{C \max} = 930$ А/м ²	$3,6 \cdot 10^4$ $4,1 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^4$ $4,5 \cdot 10^4$	$4,15 \cdot 10^4$ $4,8 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$ $4,83 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$ $4,83 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$ $4,83 \cdot 10^4$
Сталь 30ХГСА $H_{C \min} = 840$ А/м ² $H_{C \max} = 950$ А/м ²	$4,4 \cdot 10^4$ $4,97 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^4$ $5,3 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^4$ $5,5 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$ $5,65 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$ $5,8 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$ $5,8 \cdot 10^4$
Сталь 40Х $H_{C \min} = 1200$ А/м ² $H_{C \max} = 1700$ А/м ²	$6,8 \cdot 10^4$ $9,6 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$ $10,2 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$ $10,5 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4$ $10,6 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^4$ $10,8 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^4$ $11,0 \cdot 10^4$

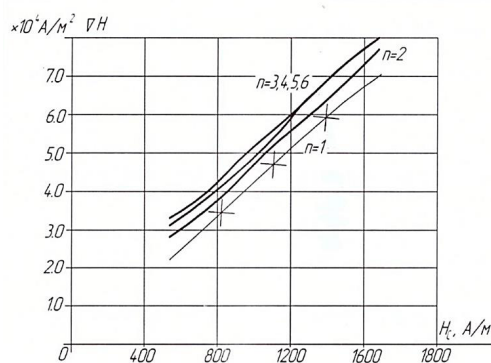


Рис. 6. Зависимость градиента напряженности поля от коэрцитивной силы ферромагнитного материала и от количества упрочненных слоев (40Х)

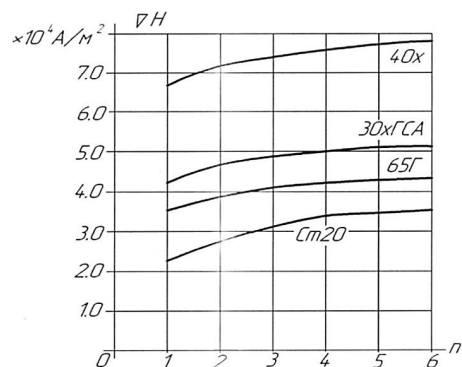


Рис. 7. Зависимость градиента напряженности магнитного поля от количества упрочненных слоев (толщина одного слоя 0,05 мм)

Таблица 2

Зависимость величины градиента напряженности магнитного поля от толщины контролируемой детали

Амплитуда импульса тока	Толщина детали, мм						
	20	15	10	8	6	4	2
	Градиент поля ∇H , А/м ²						
Сталь 20 $H_m = 10^5$ А	$2,6 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^4$
Сталь 20 $H_m = 3 \cdot 10^5$ А	$3,3 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$
Сталь 40Х $H_m = 10^5$ А	$6,7 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4$
Сталь 40Х $H_m = 3 \cdot 10^5$ А	$7,2 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$

поля от толщины упрочненного слоя (рис. 6).

На рис. 7 показана зависимость градиента напряженности магнитного поля от количества виброупрочненных слоев. Эта зависимость, кроме того что имеет существенную нелинейность, не обеспечивает сколько-нибудь приемлемый коэффициент преобразования измерительного преобразователя. Поэтому при определении толщины виброупрочненного слоя металла целесообразно дополнительно

применять метод, использующий многочастотное намагничивание ферромагнитного материала.

В табл. 2 приведены данные зависимости величины градиента напряженности магнитного поля от толщины контролируемой детали, на основе которых можно сделать вывод, что градиент вертикальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области при толщине детали до 8 мм сохраняют одни

и те же значения, а при толщине меньше 8 мм — начинают возрастать в 1,4...1,7 раза.

Выводы

1. Установлено, что имеется функциональная зависимость градиента напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области детали от коэрцитивной силы, после обработки материала возрастает коэрцитивная сила и градиент магнитного поля увеличивается в среднем на 25 %.

2. При увеличении толщины упрочненного слоя материала возрастает градиент магнитного поля, значимые изменения наблюдаются при увеличении толщины упрочненного слоя с 0,05 мм до 0,1 мм, градиент поля возрастает в среднем на 15 %.

3. Градиент вертикальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области при толщине детали от 8 мм до 20 мм сохраняет одни и те же значения, а при толщине меньше 8 мм — начинает возрастать в 1,4...1,7 раза.

Библиографический список

1. Толмачев И. И., Осадчих Ю. В. Повышение качества проведения магнитопорошковой дефектоскопии объектов с подповерхностными дефектами // Вестник науки Сибири. 2014. № 2 (12). С. 81–83.
2. Ключев В. В. [и др.]. Неразрушающий контроль и диагностика (НКиД): справ. / под ред. В. В. Ключева. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2005. 656 с. ISBN 5-217-03300-2.
3. Шелихов Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия: моногр. / под ред. В. В. Ключева. Москва: Спектр, 2010. 336 с. ISBN 978-5-904270-29-2.
4. Федоров О. В. Задачи ресурсобеспечения. Москва: КноРус, 2021. 152 с. ISBN 978-5-4365-7822-4.
5. Мирошниченко О. Н., Чурносоев А. П., Яковенко В. В. Магнитный неразрушающий контроль виброупрочненного слоя поверхности стальных изделий // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». 2011. № 19. С. 183–194.
6. Горкунов Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивости к внешним воздействиям. К вопросу о «методе магнитной памяти» // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 3–21.

7. Ушаков В. М. Неразрушающий контроль и диагностика горно-шахтного и нефтегазового оборудования. Москва: Горная книга, 2006. 318 с. ISBN 5-91003-001-9.

8. Криворудченко В. Ф., Ахмеджанов Р. А. Современные методы диагностики и контроля деталей и узлов железнодорожного транспорта / под ред. В. Ф. Криворудченко. Москва: Маршрут, 2005. С. 428–431. ISBN 5-89035-187-7.

9. Борзунов С. В., Семенов М. Е., Сельвесюк Н. И. [и др.]. Гистерезисные преобразователи со случайными параметрами // Математическое моделирование. 2019. Т. 31, № 7. С. 109–126. DOI: 10.1134/S0234087919070074.

10. Безкоровый В. С., Яковенко В. В., Швеи С. Н. Способы аппроксимации кривой намагничивания сердечников феррозондов при однополярном импульсном возбуждении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33.

ТАРАСЕНКО Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), декан факультета «Приборостроение электротехнических и биотехнических систем» Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля), г. Луганск.

SPIN-код: 2866-8611

AuthorID (РИНЦ): 1197292

Адрес для переписки: kaf-el-mex@yandex.ru

КРЕСЕЛЮК Юрий Владимирович, старший преподаватель кафедры «Электромеханика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

ИВЛЕВ Михаил Николаевич, аспирант кафедры «Электромеханика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

Для цитирования

Тарасенко О. В., Креселюк Ю. В., Ивлев М. Н. Исследование зависимости градиента магнитного поля от параметров упрочненного слоя стали при импульсном магнитном методе неразрушающего контроля // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 77–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-77-83.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023 г.

© О. В. Тарасенко, Ю. В. Креселюк, М. Н. Ивлев



THE STUDY OF DEPENDENCE OF MAGNETIC FIELD GRADIENT ON PARAMETERS OF HARDENED STEEL LAYER AT PULSE MAGNETIC METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTING

An assessment is made of the influence of the parameters of a controlled part by the magnetic method of non-destructive testing on the gradient of the magnetic field strength of the measuring transducer. A simplified design of a pulsed gradiometric transducer is presented, and its parameters for conducting experiments are indicated. A mathematical model for calculating the output signal of a gradiometer fluxgate used to obtain output data is considered. The dependences of the magnetic field intensity gradient on the distance between the sensor and the plane of the controlled part, on the coercive force and thickness of the hardened layer, as well as on the thickness of the controlled part are studied. Conclusions are drawn based of the experiment performed.

Keywords: magnetic field gradient, intensity, fluxgate, vibration-impact hardening, non-destructive testing, coercive force.

References

1. Tolmachev I. I., Osadchikh Yu. V. Povysheniye kachestva provedeniya magnitoporoshkovoy defektoskopii ob'yektov s podpoverkhnostnymi defektami [Improving the quality of magnetic particle defectoscopy of objects with subsurface defects] // *Vestnik nauki Sibiri. Vestnik Nauki Sibiri*. 2014. No. 2 (12). P. 81–83. (In Russ.).
2. Klyuyev V. V. [et al.]. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics] / ed. by V. V. Klyuyeva. 3rd ed. revised and additional. Moscow, 2005. 656 p. ISBN 5-217-03300-2. (In Russ.).
3. Shelikhov G. S. Magnitoporoshkovaya defektoskopiya [Magnetic powder flaw detection] / ed. by V. V. Klyuyeva. Moscow, 2010. 336 p. ISBN 978-5-904270-29-2. (In Russ.).
4. Fedorov O. V. Zadachi resursoobespecheniya [Problems of resource supply]. Moscow, 2021. 152 p. ISBN 978-5-4365-7822-4. (In Russ.).
5. Miroshnichenko O. N., Churnosov A. P., Yakovenko V. V. Magnitnyy nerazrushayushchiy kontrol' vibrouprochnennogo sloya poverkhnosti stal'nykh izdeliy [Magnetic non-destructive testing of vibration-hardened surface layer of steel products] // *Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut». Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. 2011. No. 19. P. 183–194. (In Russ.).
6. Gorkunov E. S. Razlichnyye sostoyaniya ostatochnoy namagnichennosti i ikh ustoychivosti k vneshnim vozdeystviyam. K voprosu o «metode magnitnoy pamyati» [Various states of residual magnetization and their stability to external influences. On the issue of the «magnetic memory method»] // *Defektoskopiya. Defectoscopy*. 2014. No. 11. P. 3–21. (In Russ.).
7. Ushakov V. M. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika gorno-shakhtnogo i neftegazovogo oborudovaniya [Non-destructive testing and diagnostics of mining and oil and gas equipment]. Moscow, 2006. 318 p. ISBN 5-91003-001-9. (In Russ.).
8. Krivorudchenko V. F., Akhmedzhanov R. A. Sovremennyye metody diagnostiki i kontrolya detaley i uzlov zheleznodorozhnogo transporta [Modern methods of diagnostics and control of parts and components of railway transport] / ed. by V. F. Krivorudchenko. Moscow, 2005. P. 428–431. ISBN 5-89035-187-7. (In Russ.).
9. Borzunov S. V., Semenov M. E., Selvesyuk N. I. [et al.]. Gisterezisnyye preobrazovateli so sluchaynymi parametrami [Hysteresis converters with random parameters] // *Matematicheskoye modelirovaniye. Mathematical Modeling*. 2019. Vol. 31, no. 7. P. 109–126. DOI: 10.1134/S0234087919070074. (In Russ.).
10. Bezkorovaynyy V. S., Yakovenko V. V., Shvets S. N. Sposoby approksimatsii krivoy namagnichivaniya serdechnikov ferrozondov pri odnopolyarnom impul'snom возбуждении [Methods of magnetization curve of ferroprobe cores approximation at unipolar pulse excitation] // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 5. P. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33. (In Russ.).

TARASENKO Oleg Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Instrumentation of Electrical and Biotechnical Systems

Faculty, Lugansk State University named after Vladimir Dal (LSU named after Vladimir Dal), Lugansk.

SPIN-code: 2866-8611

AuthorID (RSCI): 1197292

Correspondence address: kaf-el-mex@yandex.ru

KRESELYUK Yuriy Vladimirovich, Senior Lecturer of Electromechanics Department, LSU named after Vladimir Dal, Lugansk.

IVLEV Mikhail Nikolayevich, Graduate Student of Electromechanics Department, LSU named after Vladimir Dal, Lugansk.

For citations

Tarasenko O. V., Kreselyuk Yu. V., Ivlev M. N. The study of dependence of magnetic field gradient on parameters of hardened steel layer at pulse magnetic method of nondestructive testing // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 77–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-77-83.

Received May 11, 2023.

© O. V. Tarasenko, Yu. V. Kreselyuk,
M. N. Ivlev



АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ И ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Представлены формулы для расчета длительно допустимых токов и потерь активной мощности для воздушных линий электропередачи в условиях естественной и вынужденной конвекции для изолированных и неизолированных проводников. Корректное определение максимальных токовых нагрузок играет важную роль в эффективном использовании нагрузочной способности линий электропередачи, а уточнение расчета потерь активной мощности является основой для повышения экономичности передачи энергии. Полученные результаты могут быть использованы при выборе мероприятий, направленных на увеличение пропускной способности воздушных линий и снижение потерь энергии.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, температура провода, уравнение теплового баланса, потери активной мощности, температурная зависимость сопротивления, длительно допустимый ток.

Введение. Согласно исследованиям [1], в разных сценариях развития энергетики (Accelerated, Net Zero, New Momentum) доля электроэнергии в общем потреблении энергии в 2050 году возрастет в 1,9–2,4 раза по сравнению с 2019 годом (рис. 1). Глобальный спрос на электроэнергию будет расти на 1,7–5 % в год до 2050 года [1]. В абсолютных значениях ожидается, что генерация электрической энергии по всем видам производства составит около 58 ПВт·ч (Accelerated), 64 ПВт·ч (Net Zero) и 50 ПВт·ч (New Momentum) (рис. 2) [1]. Это связано с огромным общим увеличением глобального спроса на электроэнергию, причем основная часть этого роста приходится на развивающиеся страны [2]. По указанным причинам возникает потребность увеличения пропускной способности линий электропередачи [3–10].

В России основополагающими документами для решения этой проблемы являются: распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [11]. Ключевым показателем эффективности работы электросетевого комплекса является уровень потерь электроэнергии в электрических сетях. Согласно [11], к 2024 году уровень потерь не должен превышать — 9,8 %, а к 2035 году — не более 7,3 %.

Точный расчет потерь активной мощности при передаче электроэнергии является необходимым условием для обеспечения экономичности данного процесса. В свою очередь, повышение точности расчета требует детального учета всего многообразия факторов, от которых зависит величина потерь [12].

Расчетные формулы. Поставленная задача повышения пропускной способности (токов в проводнике) естественно приводит к увеличению потерь, а следовательно, и к росту температуры. Максимально допустимая температура проводника ограничена двумя факторами:

- максимальным допустимым провисанием провода линии электропередачи;
- температурным пределом повреждения проводника.

Данный факт вступает в противоречие с желаемой необходимостью увеличения пропускной способности.

Следует отметить, что, кроме зависимости от нагрузки, значение температуры сложным образом зависит от погодных условий и свойств проводников линий электропередач. Достижение максимальной пропускной способности при допустимой температуре провода является важной задачей. Её решение базируется на знании солнечного излуче-

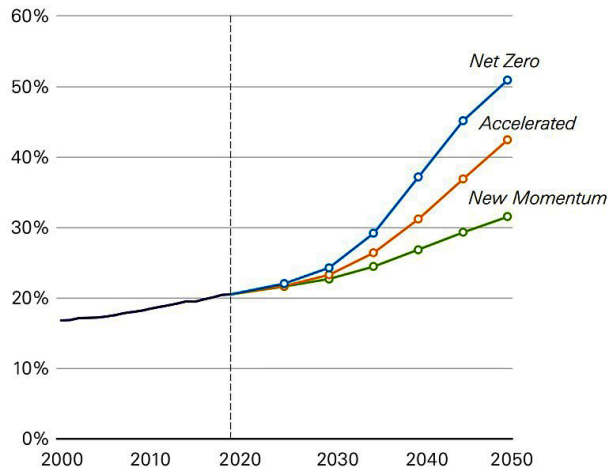


Рис. 1. Доля электроэнергии в общем потреблении энергии

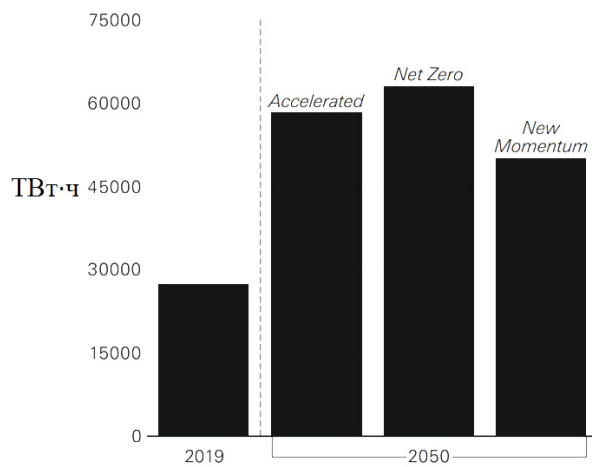


Рис. 2. Генерация по всем видам производства электрической энергии

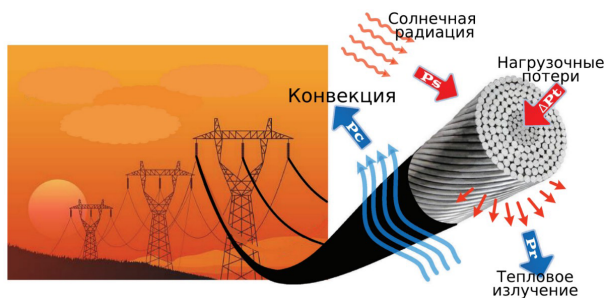


Рис. 3. Процессы передачи тепла от линии в окружающую среду [18]

ния, конвективного и радиационного охлаждения, а также физических свойств проводов линий электропередачи.

Отметим несколько нормативных документов для определения предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности неизолированных проводов и допустимых габаритов воздушных линий [13–15]. За рубежом существуют два стандарта для определения тепловых характеристик воздушной линии электропередачи, а именно стандарт CIGRE 207 и стандарт IEEE 738 [13, 14], которые можно использовать для определения максимально допустимой нагрузки неизо-

лированного проводника. Стандарты IEEE и CIGRE согласованы в использовании концепции теплового баланса, в которой выделяющееся тепло уравнивается процессом охлаждения [16]. Таким образом, в проводниках тепло не накапливается. Оба метода не имеют существенной разницы в своих результатах [17].

Процессы передачи тепла от линии в окружающую среду показаны на рис. 3 [18]. Теплоприток проводника обусловлен солнечной радиацией и нагрузочными потерями активной мощности, а отдача тепла осуществляется путем конвекции и тепловым излучением.

Уравнение теплового баланса, согласно CIGRE 207 [13, 19]:

$$P_j + P_m + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w, \quad (1)$$

где P_j — омические потери мощности, Вт/м; P_m — потери мощности, обусловленные вихревыми токами P_v и гистерезисом материалов P_h , Вт/м; P_s — интенсивность солнечной радиации, Вт/м; P_i — потери мощности, обусловленные коронным разрядом, Вт/м; P_c — мощность, отдаваемая путем конвективного теплообмена, Вт/м; P_r — мощность, отдаваемая путем излучения, Вт/м; P_w — мощность, отдаваемая путем испарения, Вт/м.

Величинами P_h , P_v , P_w можно пренебречь при практических расчетах. Таким образом, уравнение (1) упрощается до:

$$\Delta P_t + P_s = P_c + P_r, \quad (2)$$

где $\Delta P_t = P_j + P_v$ — нагрузочные потери мощности, Вт/м.

Для вычисления P_s , P_c , P_r используются формулы [13]:

$$P_s = d_{np} \cdot A_s \cdot q_{солн}, \quad (3)$$

$$P_c = d_{np} \cdot \alpha_{кон} \cdot \pi (\theta_{внеш} - \theta_{окр}), \quad (4)$$

$$P_r = d_{np} \cdot \pi \cdot \epsilon_n \cdot C_0 \cdot (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4), \quad (5)$$

где d_{np} — диаметр провода, м; A_s — поглощательная способность провода для солнечной изоляции; $q_{солн}$ — суммарная солнечная радиация, Вт/м; $\alpha_{кон}$ — коэффициент теплоотдачи, для естественной конвекции используется $\alpha_{ест}$, для вынужденной конвекции используется $\alpha_{вын}$, Вт/(м²·К); $\theta_{внеш}$ — температура внешней поверхности провода, °C; $\theta_{окр}$ — температура окружающей среды, °C; ϵ_n — коэффициент черноты поверхности провода; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); $T_{внеш}$ — абсолютная температура внешней поверхности провода, К; $T_{окр}$ — абсолютная температура окружающей среды, К.

Чтобы определить ΔP_t , $q_{солн}$, $\alpha_{вын}$, $\alpha_{ест}$, θ_{np} , используются следующие формулы [20, с. 135–137]:

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= I^2 \cdot R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{np}] = \Delta P_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{np}] = \\ &= \frac{\Delta P_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}} = \Delta P'_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}], \end{aligned} \quad (6)$$

$$q_{солн} = k_{зм} \cdot q_{s,np} \cdot \sin \varphi_s + \pi \cdot q_{s,расч}, \quad (7)$$

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_v (P \cdot V)^{0,6}}{(T_{окр} \cdot d_{np})^{0,4}} \quad (8)$$

$$\alpha_{есл} = 0,0749 \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot \sqrt{\frac{\theta_{внеш} - \theta_{окр}}{d_{пр}}}, \quad (9)$$

$$\theta_{пр} = \theta_{внеш} + \Delta P_0 \cdot S_{из} = \frac{\theta_{внеш} + \Delta P_0 \cdot S_{из}}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}}, \quad (10)$$

где I — ток в проводе, А; R_0 — погонное активное сопротивление переменному току при температуре 0°C , Ом/м; α — температурный коэффициент электрического сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; $\theta_{пр}$ — температура жилы провода, $^\circ\text{C}$; $\Delta P_0 = I_2 \cdot R_0$ — потери активной мощности, рассчитанные по сопротивлению, приведенному к 0°C , Вт/м; $S_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_{пр}}{d_{ж}}$ — тепловое сопротивление изоляции, м·К/Вт; $\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности изоляции Вт/(м·К); $d_{ж}$ — диаметр токопроводящей жилы провода, м; $\Delta P'_0 = \frac{\Delta P_0}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}}$ — потери активной мощности при условии, что температура поверхности провода равна 0°C , Вт/м; $k_{зм}$ — коэффициент затененности; $q_{с,пр}$ — плотность прямой солнечной радиации на поверхности, перпендикулярную солнечным лучам, Вт/м²; ϕ_s — угол между осью провода и направлением солнечных лучей, градус; $q_{с,расс}$ — плотность потока рассеянной солнечной радиации, Вт/м²; k_v — коэффициент, характеризующий угол атаки ветра; P — атмосферное давление, Па; V — скорость ветра, м/с.

Подставляя уравнения (3, 4, 5, 6) в уравнение (2), получим:

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] + d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн} = \\ = d_{пр} \cdot \alpha_{кон} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \\ + d_{пр} \cdot \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4). \end{aligned} \quad (11)$$

Перенесем $d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн}$ в правую часть уравнения и вынесем $d_{пр}$ как общий множитель:

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = \\ = d_{пр} \left[\alpha_{кон} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \right. \\ \left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Для случая вынужденной конвекции с помощью уравнений (8, 12) получим:

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = \\ = d_{пр} \left[\alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \right. \\ \left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для нахождения $\theta_{внеш}$ преобразуем формулу (13):

$$\begin{aligned} d_{пр} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) = \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] - \\ - d_{пр} \cdot \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн}. \end{aligned} \quad (14)$$

В результате деления левой и правой части на $d_{пр} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi$ найдем:

$$\begin{aligned} \theta_{внеш} - \theta_{окр} = \frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{d_{пр} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi} - \\ - \frac{\varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4)}{\alpha_{вын}} + \frac{A_s \cdot q_{солн}}{\alpha_{вын} \cdot \pi}. \end{aligned} \quad (15)$$

Определим $\theta_{внеш}$ за счет выноса общего множителя $\alpha_{вын} \cdot \pi$ и переноса $\theta_{окр}$ в правую часть уравнения:

$$\begin{aligned} \theta_{внеш} = \theta_{окр} + \frac{1}{\alpha_{вын} \cdot \pi} \times \\ \times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{d_{пр}} - \right. \\ \left. - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Соотношение (16) является базовым уравнением для нахождения $\theta_{внеш}$ итерационным способом.

Выведем выражение для длительно допустимого тока. Температура внешней поверхности провода и температура жилы принимаются предельно допустимыми. Подставляем уравнения (6) в уравнение (13):

$$\begin{aligned} I_{гон}^2 \cdot R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{пр,гон}] = \\ = d_{пр} \left[\alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр}) + \right. \\ \left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Разделим на $R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{пр,гон}]$ и приведем левую часть к первой степени:

$$I_{гон} = \sqrt{\frac{d_{пр} \left[\alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр}) + \right.}{R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{пр,гон}]} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн}}}. \quad (18)$$

Соотношение (18) является базовым уравнением для нахождения $I_{гон}$ итерационным способом.

Проведем аналогичные преобразования для естественной конвекции, используя уравнения (9, 12):

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = \\ = d_{пр} \left[0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot \sqrt{\frac{\theta_{внеш} - \theta_{окр}}{d_{пр}}} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \right. \\ \left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Уравнение теплового баланса для естественной конвекции:

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = \\ = d_{пр} \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{пр}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot (\theta_{внеш} - \theta_{окр})^{1,25} + \right. \\ \left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Для нахождения $\theta_{внеш}$ преобразуем формулу (20):

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = \\ = \frac{d_{пр} \cdot \pi \cdot 0,0749 \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}}}{\sqrt[4]{d_{пр}}} \cdot (\theta_{внеш} - \theta_{окр})^{1,25} + \\ + d_{пр} \cdot \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн}. \end{aligned} \quad (21)$$

Путем несложных преобразований получим:

$$(\theta_{\text{внеш}} - \theta_{\text{окр}})^{1,25} = \frac{\sqrt[4]{d_{\text{np}}}}{\pi \cdot 0,0749} \times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{внеш}}]}{d_{\text{np}}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s \cdot q_{\text{солн}} \right] \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{окр}}}{P}}. \quad (22)$$

Определим $\theta_{\text{внеш}}'$ для этого приведем уравнение к первой степени и перенесем $\theta_{\text{окр}}$ в правую часть уравнения:

$$\theta_{\text{внеш}} = \theta_{\text{окр}} + \left(\frac{\sqrt[4]{d_{\text{np}}}}{\pi \cdot 0,0749} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{окр}}}{P}} \cdot \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{внеш}}]}{d_{\text{np}}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s \cdot q_{\text{солн}} \right] \right)^{0,8}. \quad (23)$$

Проведем аналогичные преобразования и для нахождения длительно допустимого тока. Подставим уравнения (6) в уравнение (20):

$$I_{\text{гон}}^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{np.gon}}] = d_{\text{np}} \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{\text{np}}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{\text{окр}}}} \cdot (\theta_{\text{внеш.gon}} - \theta_{\text{окр}})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш.gon}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s \cdot q_{\text{солн}} \right]. \quad (24)$$

Разделим уравнение на $R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{np.gon}}]$ и приведем левую часть уравнения к первой степени:

$$I_{\text{гон}} = \sqrt{\frac{d_{\text{np}} \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{\text{np}}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{\text{окр}}}} \cdot (\theta_{\text{внеш.gon}} - \theta_{\text{окр}})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш.gon}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s \cdot q_{\text{солн}} \right]}{R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{np.gon}}]}}. \quad (25)$$

Полученные уравнения (16, 23), а также (18, 25) используем для нахождения соответственно $\theta_{\text{внеш}}$ и $I_{\text{гон}}$ итерационным способом.

$$\theta_{\text{внеш}}^{[k+1]} = \theta_{\text{окр}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вын}} \cdot \pi} \times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{внеш}}^{[k]}]}{d_{\text{np}}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s \cdot q_{\text{солн}} \right], \quad (26)$$

$$\theta_{\text{внеш}}^{[k+1]} = \theta_{\text{окр}} + \left(\frac{\sqrt[4]{d_{\text{np}}}}{\pi \cdot 0,0749} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{окр}}}{P}} \cdot \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{внеш}}^{[k]}]}{d_{\text{np}}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) + A_s \cdot q_{\text{солн}} \right] \right)^{0,8}, \quad (27)$$

$$I_{\text{гон}}^{[k+1]} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{вын}} \cdot \pi (\theta_{\text{внеш.gon}} - \theta_{\text{окр}}) + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш.gon}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s \cdot q_{\text{солн}}}{R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{np.gon}}]}}, \quad (28)$$

$$I_{\text{гон}}^{[k+1]} = \sqrt{\frac{d_{\text{np}} \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{\text{np}}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{\text{окр}}}} \cdot (\theta_{\text{внеш.gon}} - \theta_{\text{окр}})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{\text{внеш.gon}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s \cdot q_{\text{солн}} \right]}{R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{np.gon}}]}}, \quad (29)$$

где k — номер итерации; $\theta_{\text{внеш.gon}} = \theta_{\text{np.gon}}$ — предельно допустимая температура внешней поверхности провода, °C.

Потери электрической энергии определяются методом средних нагрузок [21]:

$$\Delta W = \Delta P_t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3^2 \cdot t, \quad (30)$$

где k_1 — коэффициент потерь в арматуре; k_2 — коэффициент различия графиков активной и реактивной мощности; k_3 — коэффициент формы графика суммарной нагрузки; t — продолжительность интервала, ч.

Согласно представленным формулам, разработаны и зарегистрированы программы расчета [22, 23]. Алгоритм программы [23] представлен на рис. 4–6. В настоящее время проходит регистрация программы на языке программирования Java, объединяющей программы, представленные в [22, 23].

Пример расчета. Произведем пример расчета температуры провода и потерь активной мощности в проводе ACCR-405-T16 в случае вынужденной конвекции.

Исходные данные:

$\theta_{\text{окр}} = -20$ °C; $R_{25} = 1,369 \cdot 10^{-4}$ Ом/м; $P = 100\,000$ Па; $V = 1$ м/с; $k_v = 1$; $\alpha = 0,0043$ 1/°C;

Вынужденная конвекция: допустимый ток и потери энергии

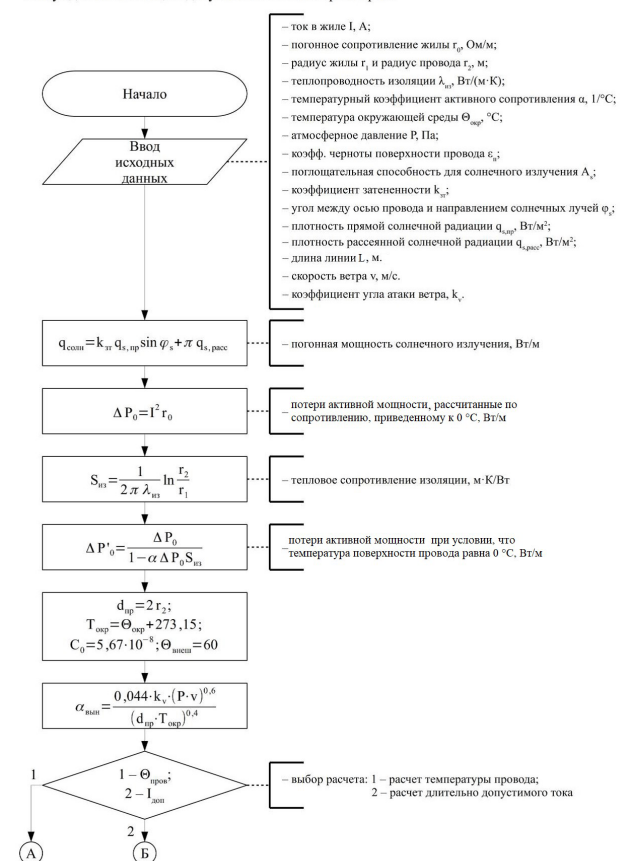


Рис. 4. Алгоритм расчета (часть 1)

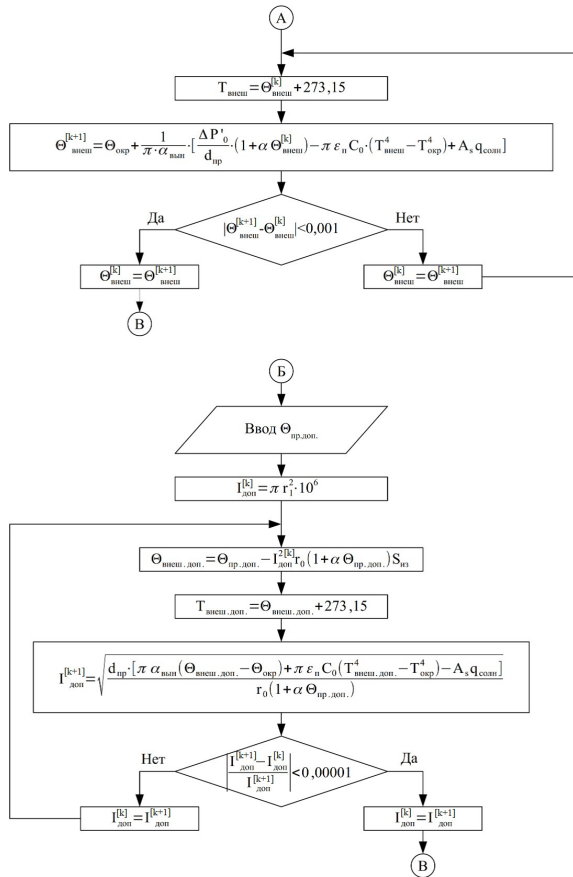


Рис. 5. Алгоритм расчета (часть 2)

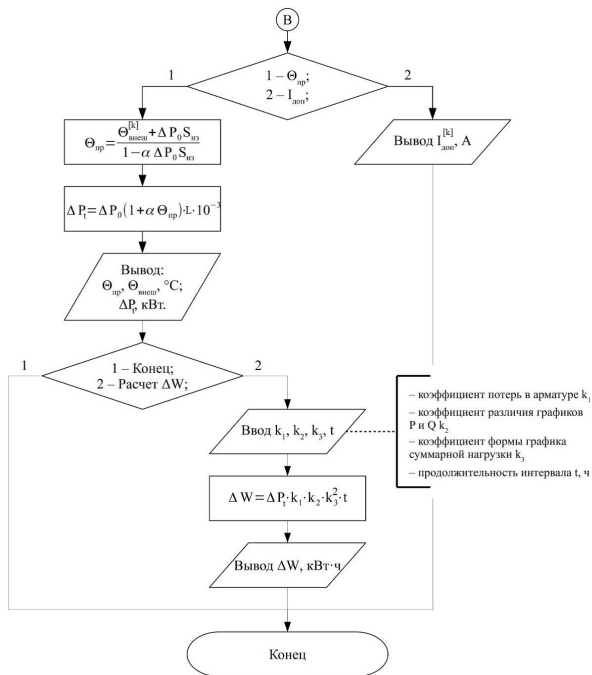


Рис. 6. Алгоритм расчета (часть 3)

$d_{np} = 0,0201$ м; $q_{s,np} = 500$ Вт/м²; $q_{s,расс} = 100$ Вт/м²; $k_{зм} = 0,7$; $\varphi_s = 45^\circ$; $\varepsilon_n = 0,6$; $A_s = 0,6$; $I = 1370$ А. Используя приведенные выше уравнения:

$$R_0 = \frac{R_{25}}{1 + \alpha \cdot 25} = \frac{1,369 \cdot 10^{-4}}{1 + 0,0043 \cdot 25} = 1,236 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}, \quad (31)$$

$$q_{солн} = k_{зм} \cdot q_{s,np} \cdot \sin \varphi_s + \pi \cdot q_{s,расс} = 0,7 \cdot 500 \cdot \sin(45) + \pi \cdot 100 = 561,487 \text{ Вт/м}, \quad (32)$$

$$\Delta P_0 = I_2 \cdot R_0 = 1370^2 \cdot 1,236 \cdot 10^{-4} = 232,007 \text{ Вт/м}, \quad (33)$$

$$S_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_{np}}{d_{ж}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{0,0201}{0,0201} = 0 \text{ м·К/Вт}, \quad (34)$$

$$\Delta P'_0 = \frac{\Delta P_0}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{из}} = \frac{232,007}{1 - 0,0043 \cdot 232,007 \cdot 0} = 232,007 \text{ Вт/м}, \quad (35)$$

$$T_{окр} = \theta_{окр} + 273,15 = 253,15 \text{ К}, \quad (36)$$

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_V (P \cdot V)^{0,6}}{(T_{окр} \cdot d_{np})^{0,4}} = 0,044 \frac{1 \cdot (100000 \cdot 1)^{0,6}}{(253,15 \cdot 0,0201)^{0,4}} = 22,952 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (37)$$

Первое приближение $\theta_{внеш}^{[k]} = 60^\circ \text{C}$.
Цикл 1:

$$T_{внеш} = \theta_{внеш}^{[k]} + 273,15 = 60 + 273,15 = 333,15 \text{ К}, \quad (38)$$

$$\theta_{внеш}^{[k+1]} = \theta_{окр} + \frac{1}{\alpha_{вын} \cdot \pi} \times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}^{[k]}]}{d_{np}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right] = 60 + \frac{1}{22,952 \cdot \pi} \times \left[\frac{232,007 \cdot [1 + 0,0043 \cdot 60]}{0,0201} - \pi \cdot 0,6 \cdot C_0 (333,15^4 - 253,15^4) + 0,6 \cdot 561,487 \right] = 173,983^\circ \text{C}. \quad (39)$$

Проверка $|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 173,983 - 60 = 113,983 > 0,001$.

Цикл 2:

$$T_{внеш} = 447,133 \text{ К}; \theta_{внеш}^{[k+1]} = 211,495^\circ \text{C};$$

$$|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 37,511 > 0,001.$$

Цикл 3:

$$T_{внеш} = 484,645 \text{ К}; \theta_{внеш}^{[k+1]} = 214,802^\circ \text{C};$$

$$|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 3,307 > 0,001.$$

Цикл 4:

$$T_{внеш} = 487,952 \text{ К}; \theta_{внеш}^{[k+1]} = 214,825^\circ \text{C};$$

$$|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 0,023 > 0,001.$$

Цикл 5:

$$T_{\text{внеш}} = 487,975 \text{ К}; \theta_{\text{внеш}}^{[k+1]} = 214,825 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$|\theta_{\text{внеш}}^{[k+1]} - \theta_{\text{внеш}}^{[k]}| = 4 \cdot 10^{-6} < 0,001.$$

$$\begin{aligned} \theta_{\text{пр}} &= \frac{\theta_{\text{внеш}} + \Delta P_t \cdot S_{\text{из}}}{1 - \alpha \cdot \Delta P_t \cdot S_{\text{из}}} = \\ &= \frac{214,825 + 232,007 \cdot 0}{1 - 0,0043 \cdot 232,007 \cdot 0} = 214,825 \text{ }^{\circ}\text{C}, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= \Delta P_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{пр}}] = \\ &= 232,007 \cdot [1 + 0,0043 \cdot 214,825] = \\ &= 446,322 \text{ Вт/м}. \end{aligned} \quad (41)$$

Достоверность вычислений с использованием программного комплекса [22, 23] и стандарта ОАО «ФСК ЕЭС» [15] представлена в [20, с. 141]. Достоверность расчетов была также подтверждена [24, 25] в результате сравнения с вычислениями, основанными на стандартах CIGRE 207, IEEE 738.

Результаты применения разработанных программ представлены на рис. 7, 8 при указанных выше условиях.

Заключение. Получены уравнения для нахождения длительно допустимых токов и потерь активной мощности проводов воздушных линий, отличающихся от известных тем, что они позволяют с единых позиций проводить расчеты неизолированных и изолированных проводов в условиях естественной и вынужденной конвекции при учете температуры токопроводящих жил и температуры поверхности провода. Внедрение полученных результатов в проектную расчетную и эксплуатационную практику воздушных линий электроэнергетических систем обеспечивает расширение возможностей по разработке мер на повышение качества обоснования

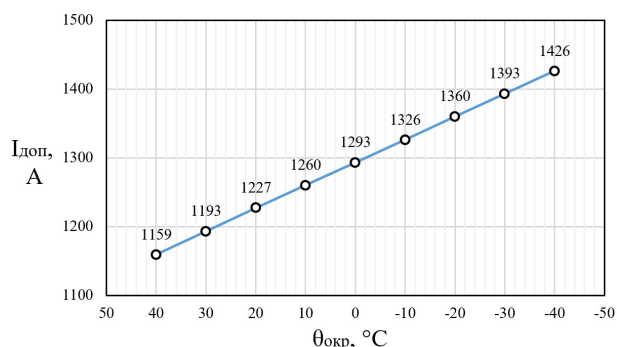


Рис. 7. Длительно допустимый ток провода АССР-405-Т16

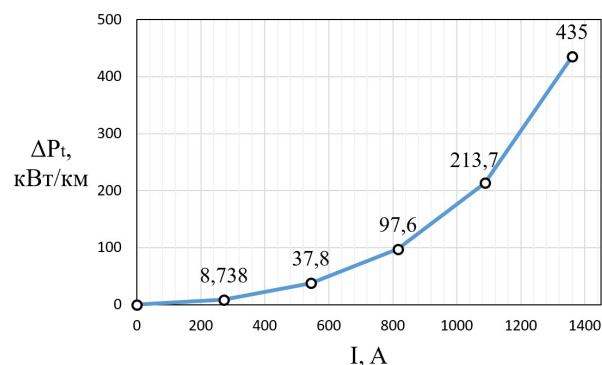


Рис. 8. Потери активной мощности провода АССР-405-Т16

нормативов и выбора мероприятий по уменьшению потерь, на уменьшение затрат на транспортировку электрической энергии за счет уменьшения потерь, на модернизацию существующих программных средств по расчету потерь электрической энергии с меньшим, чем ранее количеством допущений, на повышении эффективности внедрения новых типов проводов.

Достоверность вычислений по разработанным программам подтверждается сравнением со стандартами CIGRE 207 и IEEE 738.

Библиографический список

1. Energy Outlook 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (дата обращения: 27.03.2023).
2. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://ru.usembassy.gov/wp-content/uploads/sites/138/WorldEnergyOutlook20221.pdf> (дата обращения: 27.03.2023).
3. Masaud T. M., El-Saadany E. F. Optimal Wind DG Integration for Security Risk-Based Line Overload Enhancement: A Two Stage Approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11939–11947. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965157.
4. Воротницкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях: Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта. Часть 1 // Библиотека электротехника. 2021. № 4-5. DOI: 10.34831/EP.2021.268.4.001.
5. Воротницкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях: Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта. Часть 2. // Библиотека электротехника. 2021. № 11-12. DOI: 10.34831/EP.2021.275.11.001.
6. Воротницкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях: сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта: моногр. Москва: Инфра-Инженерия, 2023. 308 с. ISBN 978-5-9729-1388-6.
7. Dève H. E. Importance of materials in composite conductors // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 172. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.03.022.
8. Fan F., Bell K., Infield D. Transient-state real-time thermal rating forecasting for overhead lines by an enhanced analytical method // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.11.003.
9. Bedialauneta M. T., Albizu I., Fernandez E. [et al.]. Uncertainties in the Testing of the Coefficient of Thermal Expansion of Overhead Conductors // Energies. 2020. Vol. 13, no. 2. P. 1–13. DOI: 10.3390/en13020411.
10. Martinez R., Manana M., Arroyo A. [et al.]. Dynamic Rating Management of Overhead Transmission Lines Operating under Multiple Weather Conditions // Energies. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 59–63. DOI: 10.3390/en14041136.
11. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
12. Varygina A. O., Savina N. V. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112085.
13. Iglesias J., Watt G., Douglass D. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines // CIGRE. 2014. 95 p.
14. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors // IEEE. 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858.

15. СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Введ. 2013–02–13. Москва: ОАО «ФСК ЕЭС», 2013. 42 с.

16. Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 600–612. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001.

17. Hathout I., Callery K., Trac J. [et al.]. Impact of Thermal Stresses on the End of Life of Overhead Transmission Conductors // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586574.

18. Morteza A., Sadipour M., Fard R. S. [et al.]. A dagging-based deep learning framework for transmission line flexibility assessment // *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 17, no. 5. P. 1092–1105. DOI: 10.1049/rpg2.12663.

19. Sarajlić M., Pihler J., Sarajlić N. [et al.]. Identification of the Heat Equation Parameters for Estimation of a Bare Overhead Conductor's Temperature by the Differential Evolution Algorithm // *Energies*. 2018. Vol. 11. P. 1–17. DOI: 10.3390/en11082061.

20. Петрова Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи // *Известия Транссиба*. 2019. № 3 (39). С. 134–145.

21. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. Москва: ЭНАС, 2016. 456 с. ISBN 978-5-93196-958-9.

22. Петрова Е. В. Расчет потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий электро-энергетических систем в условиях естественной конвекции с учетом погодных факторов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // *Реестр программ для ЭВМ*. № 2019619360 от 16.07.2019.

23. Петрова Е. В. Определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // *Реестр программ для ЭВМ*. № 2019660200 от 02.08.2019.

24. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A Mathematical Model of Steady-State Thermal Regime of Insulated Overhead Line Conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481.

25. Gómez F. Á., María J. M., Puertas D. G. [et al.]. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in

electrical power lines // *World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*. 2011. P. 149–153.

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapov_vladislav@mail.ru

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

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

Для цитирования

Петрова Е. В., Гиршин С. С., Криволапов В. А., Горюнов В. Н., Троценко В. М. Анализ длительно допустимых токов и потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических факторов // *Омский научный вестник*. 2023. № 4 (188). С. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023 г.

© Е. В. Петрова, С. С. Гиршин,

В. А. Криволапов,

В. Н. Горюнов, В. М. Троценко

THE ANALYSIS OF CONTINUOUS ADMISSIBLE CURRENTS AND ACTIVE POWER LOSSES IN OVERHEAD POWER LINES TAKING INTO ACCOUNT CLIMATIC FACTORS

Formulas for calculating continuous admissible currents and active power losses for overhead power transmission lines under conditions of natural and forced convection for insulated and non-insulated conductors are presented. The correct determination of maximum current loads plays an important role in the efficient use of the load capacity of power transmission lines, and the refinement of the calculation of active power losses is the basis for increasing the efficiency of energy transmission. The results obtained can be used in the selection of measures aimed at increasing the capacity of overhead lines and reducing energy losses.

Keywords: overhead power lines, wire temperature, heat balance equation, active power losses, temperature dependence of resistance, continuous admissible current.

References

1. Energy Outlook 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (accessed: 27.03.2023). (In Engl.).
2. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://ru.usembassy.gov/wp-content/uploads/sites/138/WorldEnergyOutlook20221.pdf> (accessed: 27.03.2023). (In Engl.).
3. Masaud T. M., El-Saadany E. F. Optimal Wind DG Integration for Security Risk-Based Line Overload Enhancement: A Two Stage Approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11939–11947. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965157. (In Engl.).
4. Vorotnitskiy V. E., Mogilenko A. V. Snizheniye poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: Sravnitel'nyy analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta. Chast' 1 [Reduction of electricity losses in distribution networks: Comparative analysis of foreign and domestic experience. Part 1] // Bibliotekha elektrotekhnika. *Electrician's Library*. 2021. No. 4-5. DOI: 10.34831/EP.2021.268.4.001. (In Russ.).
5. Snizheniye poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: Sravnitel'nyy analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta. Chast' 2 [Reduction of electricity losses in distribution networks: Comparative analysis of foreign and domestic experience. Part 2] // Bibliotekha elektrotekhnika. *Electrician's Library*. 2021. No. 11-12. DOI: 10.34831/EP.2021.275.11.001. (In Russ.).
6. Vorotnitskiy V. E., Mogilenko A. V. Snizheniye poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: Sravnitel'nyy analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta [Reducing electricity losses in electricity distribution grids: a comparative analysis of foreign and domestic experience]. Moscow, 2023. 308 p. ISBN 978-5-9729-1388-6. (In Russ.).
7. Dève H. E. Importance of materials in composite conductors // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 172. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.03.022. (In Engl.).
8. Fan F., Bell K., Infield D. Transient-state real-time thermal rating forecasting for overhead lines by an enhanced analytical method // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.11.003. (In Engl.).
9. Bedialauneta M. T., Albizu I., Fernandez E. [et al.]. Uncertainties in the Testing of the Coefficient of Thermal Expansion of Overhead Conductors // Energies. 2020. Vol. 13, no. 2. P. 1–13. DOI: 10.3390/en13020411. (In Engl.).
10. Martinez R., Manana M., Arroyo A. [et al.]. Dynamic Rating Management of Overhead Transmission Lines Operating under Multiple Weather Conditions // Energies. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 59–63. DOI: 10.3390/en14041136. (In Engl.).
11. Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r [On Approval of the Energy Strategy of the Russian Federation until 2035: Decree of the Government of the Russian Federation of 9 June 2020 No. 1523-r]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
12. Varygina A. O., Savina N. V. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112085. (In Engl.).
13. Iglesias J., Watt G., Douglass D. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines // CIGRE. 2014. 95 p. (In Engl.).

14. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors // IEEE. 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858. (In Engl.).
15. STO 56947007-29.240.55.143-2013. Metodika rascheta predel'nykh tokovykh nagruzok po usloviyam sokhraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimyykh gabaritov vozdukhnykh liniy: Standart organizatsii OAO «FSK EES» [STO 56947007-29.240.55.143-2013. Calculation methodology for current limit loads on conditions of mechanical strength of wires and permissible dimensions of overhead lines: Standard of the organization «FGC UES»]. Moscow, 2013. 42 p. (In Russ.).
16. Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 600–612. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001. (In Engl.).
17. Hathout I., Callery K., Trac J. [et al.]. Impact of Thermal Stresses on the End of Life of Overhead Transmission Conductors // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586574. (In Engl.).
18. Morteza A., Sadipour M., Fard R. S. [et al.]. A dagging-based deep learning framework for transmission line flexibility assessment // IET Renewable Power Generation. 2022. Vol. 17, no. 5. P. 1092–1105. DOI: 10.1049/rpg2.12663. (In Engl.).
19. Sarajlić M., Pihler J., Sarajlić N. [et al.]. Identification of the Heat Equation Parameters for Estimation of a Bare Overhead Conductor's Temperature by the Differential Evolution Algorithm // Energies. 2018. Vol. 11. P. 1–17. DOI: 10.3390/en11082061. (In Engl.).
20. Petrova E. V. Otsenka vliyaniya solnechnoy radiatsii na nagruzochnyye poteri aktivnoy moshchnosti v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh liniy elektroperedachi [Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines] // Izvestiya Transsiba. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 3 (39). P. 134–145. (In Russ.).
21. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. Electricity quality: a guide for practical calculations]. Moscow, 2016. 456 p. ISBN 978-5-93196-958-9. (In Russ.).
22. Petrova E. V. Raschet poter' elektricheskoy energii i dopustimyykh znacheniy toka v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh vozdukhnykh liniy elektroenergeticheskikh sistem v usloviyakh estestvennoy konveksii s uchetom pogodnykh faktorov: svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM [Calculation of electric energy losses and allowable current values in high-temperature and self-supporting insulated conductors of overhead lines of electric power systems under conditions of natural convection with regard to weather factors: egestion certificate of a computer programme]. No. 2019619360. (In Russ.).
23. Petrova E. V. Opredeleniye poter' elektricheskoy energii i dopustimyykh znacheniy toka v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh vozdukhnykh liniy s uchetom pogodnykh izmeneniy: svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM [Determination of power losses and current

carrying capacities of high-temperature and self-supporting insulated overhead line conductors, taking weather-related changes into account: registration certificate of a computer programme]. No. 2019660200. (In Russ.).

24. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A Mathematical Model of Steady-State Thermal Regime of Insulated Overhead Line Conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481. (In Engl.).

25. Gómez F. Á., María J. M., Puertas D. G. [et al.]. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines // World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). 2011. P. 149–153. (In Engl.).

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

GIRSHIN Stanislav Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich, Graduate Student of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: krivolapov_vladislav@mail.ru

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

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimorgoryunov2016@yandex.ru

TROTSSENKO Vladislav Mikhaylovich, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3958-5882

AuthorID (RSCI): 889516

For citations

Petrova E. V., Girshin, S. S., Krivolapov V. A., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92.

Received April 10, 2023.

© E. V. Petrova, S. S. Girshin, V. A. Krivolapov,

V. N. Goryunov, V. M. Trotsenko

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ И СРАВНЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ И СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье рассмотрено распределение температуры с повышенными токами в нестационарном тепловом режиме воздушных линий электропередачи. Построено распределение температуры по длине линии для проводов марок АС-240/32 и G(Z)TACSR 240. Построены зависимости температуры от времени. Практическая ценность рассматриваемой в статье математической модели заключается в определении максимальных температур воздушных линий разных сечений в нормальном или послеаварийном режиме провода. Проведен сравнительный анализ потерь активной мощности в стационарном тепловом режиме с учетом и без учета осевой передачи тепла. Сравнение показало, что учет осевой передачи тепла уточняет потери активной мощности, что позволяет с большей точностью ввести мероприятия по уменьшению этих потерь.

Ключевые слова: потери мощности, неизолированный провод, нестационарный тепловой режим, стационарный тепловой режим, температура провода, уравнение теплопроводности, осевая передача тепла, метод конечных разностей.

На данный момент актуальным направлением в электроэнергетике является учет тепловых процессов в воздушных линиях электропередачи. Подтверждается этот факт множеством научных статей. В публикациях описаны способы повышения точности расчета потерь активной мощности с учетом тепловых процессов как для стационарного режима неизолированных [1, 2] и изолированных проводов [1, 3, 4], так и для нестационарного режима неизолированных [5, 6] и изолированных [7] проводов. В научной статье [8] подробно описывается метод, основанный на динамическом тепловом расчете линии с учетом погодных условий в реальном времени, рассмотрено повышение пропускной способности линии на примере реальной распределительной сети. Однако все вышеперечисленные научные труды обладают недостатком, а именно они не учитывают осевую передачу тепла. Также расчет температуры производится в нормальном режиме работы провода. Если математическая модель, представленная в [9] с учетом радиальной передачи тепла, решает данный недостаток, то для учета осевой передачи тепла область изучения не полностью. Поэтому произведем тепловую оценку повышенных токов при распределении их по длине линии для нестационарного теплового режима провода.

Уравнение теплопроводности неизолированного провода для осевой передачи тепла. Запишем частный случай уравнения теплопроводности тонкого стержня, приведенного в [9], в котором конкретизированы способы охлаждения и учтена температурная зависимость активного сопротивления провода. Как и в предыдущем источнике [9], ввиду излишней громоздкости, не будем учитывать солнечную радиацию. С учетом вышесказанного, уравнение теплопроводности примет следующий вид

$$\lambda F \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + I^2 r_0 (1 + \alpha \Theta) - 2\pi g_{mn} (\Theta - \Theta_{окр}) = C_n \frac{\partial \Theta}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности провода; F и r — сечение и радиус провода; Θ и $\Theta_{окр}$ — температуры провода и окружающей среды, °C; I — сила электрического тока; r_0 — погонное активное сопротивление провода при 0 °C; α — температурный коэффициент сопротивления; g_{mn} — коэффициент теплопередачи (формула для его расчета представлена в [9]); C_n — погонная теплоемкость провода (теплоемкость на единицу длины); t — время.

Метод конечных разностей для решения уравнения теплопроводности для нестационарного режи-

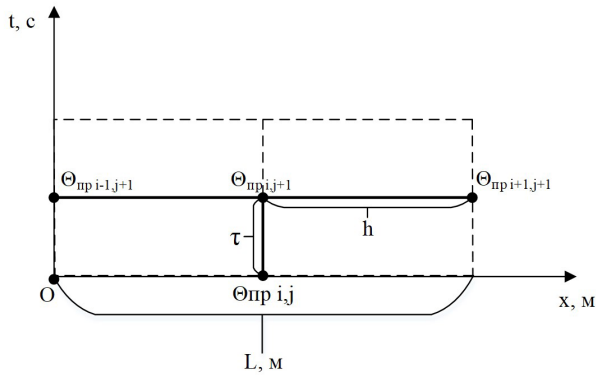


Рис. 1. Шаблон четырехточечной неявной конечно-разностной схемы

ма провода. Уравнение (1) в общем случае можно решить только численными методами. Сперва для решения этой задачи был рассмотрен и метод пристрелки (метод стрельбы), он позволяет задать граничные условия по концам провода, но решение все равно расходится, из-за большой длины провода. Поэтому прибегнем к методу конечных разностей. Этот метод, в отличие от метода конечных элементов, выбран по причине достаточно быстрой сходимости решения и малозатратности ресурсов при вычислении на ЭВМ. У метода конечных разностей существует два подхода для решения уравнения теплопроводности (1) [10]. Первый основан на составлении явной конечно-разностной схемы, но так как эта схема считается условно-устойчивой [10] из-за строгого задания шага конечно-разностной сетки, то в дальнейшем будем использовать неявную конечно-разностную схему (рис. 1).

Граничные условия приведены ниже:

$$\begin{cases} t = 0 : \Theta_{np} = \Theta_0 = \Theta_{окр}, 0 \leq x \leq L \\ x = [0, L] : \Theta_0 = \Theta_{r1} = \Theta_{r2}, [0, t] \end{cases} \quad (2)$$

Пространственный шаг представлен в следующем виде

— по оси Ox h

$$h = \frac{L}{N}, \quad (3)$$

— по времени τ

$$\tau = \frac{t}{J}, \quad (4)$$

где L — длина провода, м; N — число отрезков при разбиении по координате x ; t — расчетное время, с; J — число отрезков при разбиении по расчетному времени t .

Заменим дифференциальное уравнение в частных производных (1) его разностным аналогом для всех слагаемых, содержащих переменную Θ_{np} .

Получим следующие выражения (5–6):

$$\frac{\partial \Theta_{np}}{\partial t} = \frac{\Theta_{np\ i,j+1} - \Theta_{np\ i,j}}{\tau}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta_{np}}{\partial x^2} = \frac{\Theta_{np\ i+1,j+1} - 2\Theta_{np\ i,j+1} + \Theta_{np\ i-1,j+1}}{h^2}. \quad (6)$$

Подставим их в уравнение (1), и после преобразований относительно Θ_{np} , получим уравнение (7)

$$\begin{aligned} \frac{\lambda F}{h^2} \Theta_{np\ i+1,j+1} - \left(\frac{2\lambda F}{h^2} + \frac{c\rho F}{\tau} + 2\pi r a_{mn} - I^2 r_0 \alpha \right) \Theta_{np\ i,j+1} + \\ + \frac{\lambda F}{h^2} \Theta_{np\ i-1,j+1} = \\ = -\frac{c\rho F}{\tau} \Theta_{np\ i,j} - I^2 r_0 - 2\pi r a_{mn} \Theta_{окр}. \end{aligned} \quad (7)$$

После чего заменим свободные члены уравнения (7) следующими коэффициентами:

$$\begin{cases} A = \frac{\lambda F}{h^2} \\ B = \frac{2\lambda F}{h^2} + \frac{c\rho F}{\tau} + 2\pi r a_{mn} - I^2 r_0 \alpha \\ Y_i = -\frac{c\rho F}{\tau} \Theta_{np\ i,j} - I^2 r_0 - 2\pi r a_{mn} \Theta_{окр}. \end{cases} \quad (8)$$

Получим следующее уравнение (9):

$$A(\Theta_{np\ i+1,j+1} + \Theta_{np\ i-1,j+1}) - B\Theta_{np\ i,j+1} = Y_i. \quad (9)$$

Далее, чтобы избавиться от $\Theta_{np\ i-1,j+1}$, введем прогоночные коэффициенты α_{i-1} и β_{i-1} , при которых можно получить следующее значение $\Theta_{np\ i,j+1}$, т.е.

$$\Theta_{np\ i-1,j+1} = \alpha_{i-1} \Theta_{np\ i,j+1} + \beta_{i-1}, \quad (10)$$

$$\Theta_{np\ i,j+1} = \alpha_i \Theta_{np\ i+1,j+1} + \beta_i. \quad (11)$$

Из уравнения (10) подставим $\Theta_{np\ i-1,j+1}$ в уравнение (9) и выразим $\Theta_{np\ i,j+1}$.

Тогда

$$\Theta_{np\ i,j+1} = \frac{A}{B - A\alpha_{i-1}} \Theta_{np\ i+1,j+1} + \frac{A\beta_{i-1} - Y_i}{B - A\alpha_{i-1}}, \quad (12)$$

где коэффициенты $\frac{A}{B - A\alpha_{i-1}}$ и $\frac{A\beta_{i-1} - Y_i}{B - A\alpha_{i-1}}$ не что иное, как α_i и β_i уравнения (11), т.е.

$$\alpha_i = \frac{A}{B - A\alpha_{i-1}}, \quad (13)$$

$$\beta_i = \frac{A\beta_{i-1} - Y_i}{B - A\alpha_{i-1}}. \quad (14)$$

На следующем этапе, чтобы определить α_i и β_i , необходимо найти начальные значения α_1 и β_1 , которые мы сможем определить исходя из граничных условий, таких как

$$\Theta_{np1} = \alpha_1 \Theta_{np2} + \beta_1, \text{ т.к. } \Theta_{np1} = \Theta_{np} = \Theta_{r1},$$

то отсюда следует, что

$$\alpha_1 = 0, \beta_1 = \Theta_{r1}. \quad (15)$$

Согласно [10], для достаточных условий корректности и устойчивости прогонки уравнений (9) должны выполняться следующие условия

$$|B| > |A| + |A|, \forall i = 1..N+1 \text{ и } |\alpha_i| < 1 \Rightarrow |\beta_i| < 1. \quad (16)$$

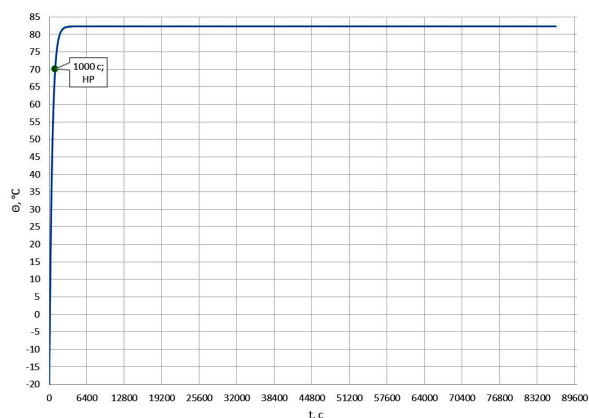


Рис. 2. Зависимость $\Theta(t)$ для АС-240/32 при $1,2 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 1$ м, температура взята при $x = 0,5$ м (НР), $x = 0,5$ м (ПАР)

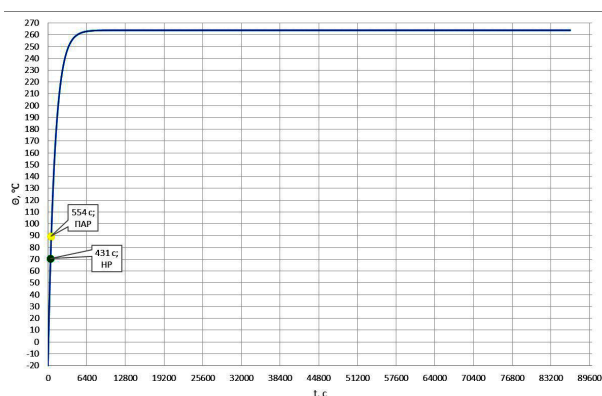


Рис. 3. Зависимость $\Theta(t)$ для АС-240/32 при $1,4 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 10$ м, температура взята при $x = 9,6$ м (НР), $x = 9,5$ м (ПАР)

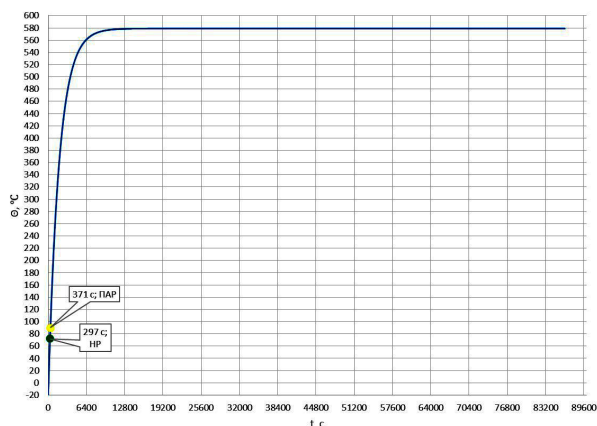


Рис. 4. Зависимость $\Theta(t)$ для АС-240/32 при $1,6 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 100$ м, температура взята при $x = 99,9$ м (НР), $x = 99,9$ м (ПАР)

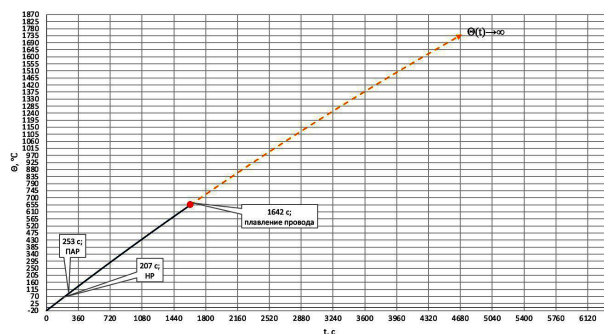


Рис. 5. Зависимость $\Theta(t)$ для АС-240/32 при $1,848 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 10000$ м, где пунктирной линией показана формальная область решения уравнения, не имеющая отношения к реальному объекту, температура взята при $x = 9,99$ км (НР), $x = 9,99$ км (ПАР)

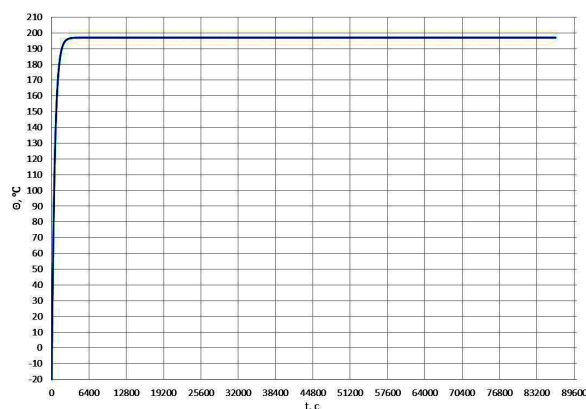


Рис. 6. Зависимость $\Theta(t)$ для G(Z)TACSR 240 при $1,1 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 1$ м

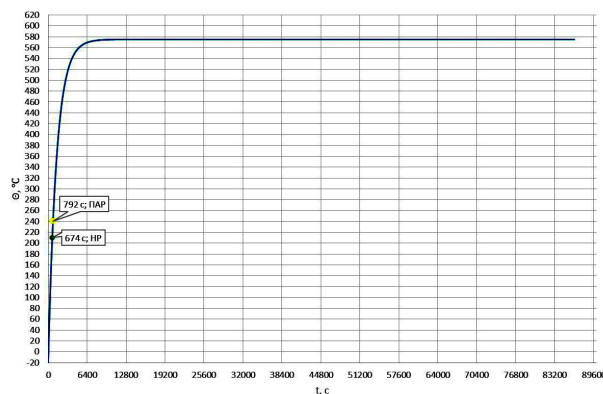


Рис. 7. Зависимость $\Theta(t)$ для G(Z)TACSR 240 при $1,2 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 10$ м, температура взята при $x = 9,6$ м (НР), $x = 9,5$ м (ПАР)

Пример численного решения уравнения теплопроводности для нестационарного режима провода. Проведем тепловую оценку повышенных токов с учетом времени для провода АС-240/32 и высокотемпературного провода G(Z)TACSR 240 напряжением 220 кВ, при различных длинах 1 м, 10 м, 100 м, 10 км с граничными условиями $\Theta_0 = \Theta_{r1} = \Theta_{r2} = -20$ °С и температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = -20$ °С (рис. 2–9). Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Здесь повышенный

ток был рассчитан исходя из уравнения в [9]. Он соответствует температуре неограниченно длинного провода, равного $\Theta_g = +\infty$, в целях показать неограниченный рост теплового масштаба длины.

Выводы и заключение. Как доказано ранее в [9], влияние граничных условий зависит от теплового масштаба длины, и если длина линии для стационарного режима провода превышает (200...500) LT, то граничные условия перестают влиять на ее температурный режим, что и показано на рис. 10

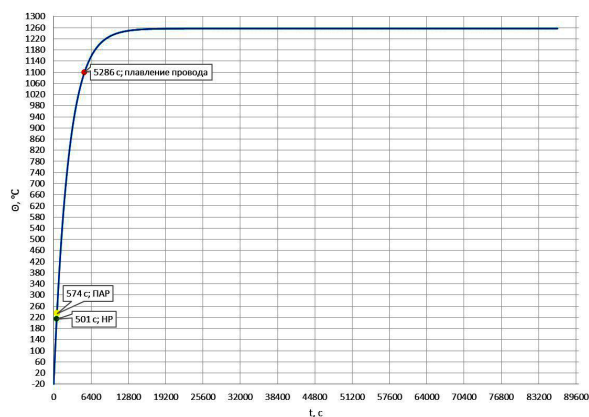


Рис. 8. Зависимость $\Theta(t)$ для G(Z)TACSR 240 при $1,3 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 100$ м, температура взята при $x = 99,9$ м (НР), $x = 99,9$ м (ПАР)

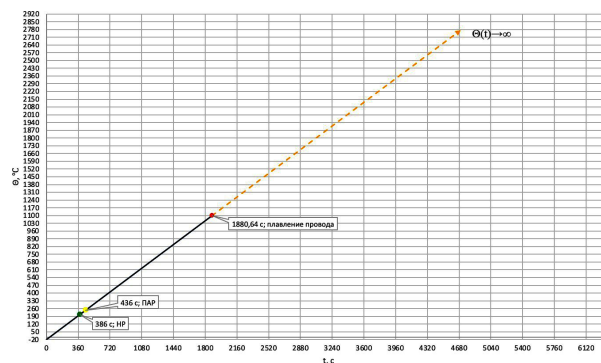


Рис. 9. Зависимость $\Theta(t)$ для G(Z)TACSR 240 при $1,411 I_{Aоп}$ и длине линии $L = 10000$ м, где пунктирной линией показана формальная область решения уравнения, не имеющая отношения к реальному объекту, температура взята при $x = 9,99$ км (НР), $x = 9,99$ км (ПАР)

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Наименование и обозначение параметра	AC-240/32	G(Z)TACSR 240
Погонное активное сопротивление при 0°C r_0 , Ом/км	0,1094	0,1101
Сечение токоведущей части провода F , мм ²	240	248,4
Радиус металлической части провода r , мм	10,8	10,3
Допустимый ток $I_{Aоп}$, А	605	1190
Ток, при котором $\Theta_A = +\infty$, кА	1,5812	1,872
Допустимая температура $\Theta_{Aоп}$, $^\circ\text{C}$	70	210

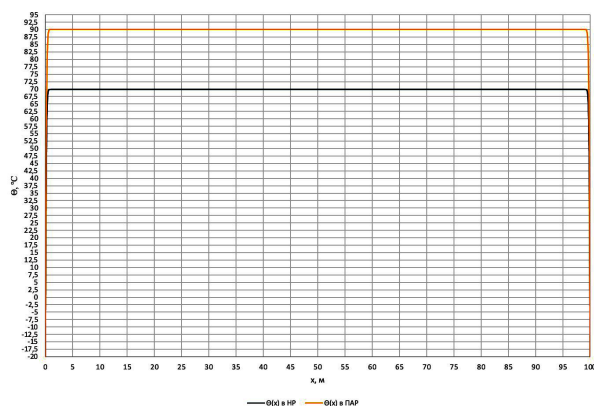


Рис. 10. Распределение температуры по длине линии (100 м) в разных режимах провода AC-240/32 для $t = 297$ с (НР), $t = 371$ с (ПАР)

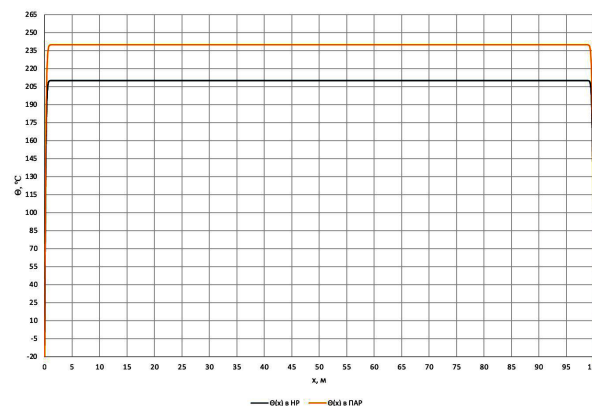


Рис. 11. Распределение температуры по длине линии (100 м) в разных режимах провода G(Z)TACSR 240 для $t = 501$ с (НР), $t = 574$ с (ПАР)

и рис. 11. В остальных же случаях (рис. 12–15) наблюдается существенное влияние граничных условий, например, максимум температуры при длине линии в 1 м для неизолированных проводов AC-240/32 и G(Z)TACSR 240 приходится ровно на половину от всей длины воздушной линии электропередачи. Можно сказать, что рассматриваемая математическая модель при осевой передаче тепла имеет практическую ценность.

К примеру, по рис. 10–14 можно определить максимальную температуру провода для нормального и послеаварийного режима. А по рис. 5 (AC-240/32) и рис. 9 (G(Z)TACSR 240) — при повышенных токах, когда $\Theta_g = +\infty$ при достижении

времени 1642 с ($\Theta_{пл.пр. AC} = 660^\circ\text{C}$) и соответственно 1881 с ($\Theta_{пл.пр. G(Z)TACSR} = 1100^\circ\text{C}$) наблюдается плавление токоведущих частей провода. К тому же для стационарного теплового режима с учетом осевой передачи тепла (формула (1)) и без учета (расчетные формулы приведены в [6]), максимальная относительная погрешность потерь мощности при $t = \infty$ (табл. 2) составила 4,05 %. Отсюда можно сделать следующий вывод, что учет осевой передачи тепла уточняет потери активной мощности, что позволяет с большей точностью ввести мероприятия по уменьшению этих потерь. Также представленные на рис. 10–15 результаты численного расчета в дальнейшем позволят применить данную матема-

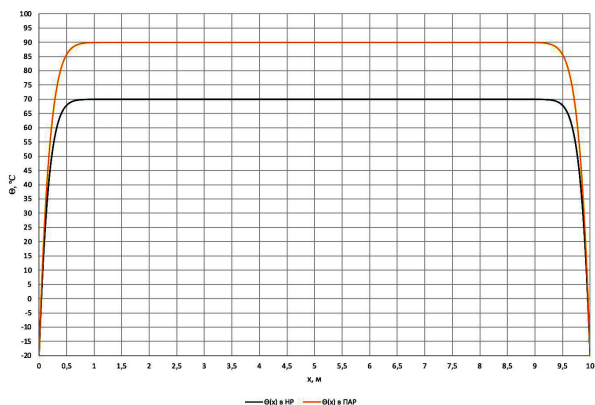


Рис. 12. Распределение температуры по длине линии (10 м) в разных режимах провода AC-240/32 для $t = 431$ с (НР), $t = 554$ с (ПАР)

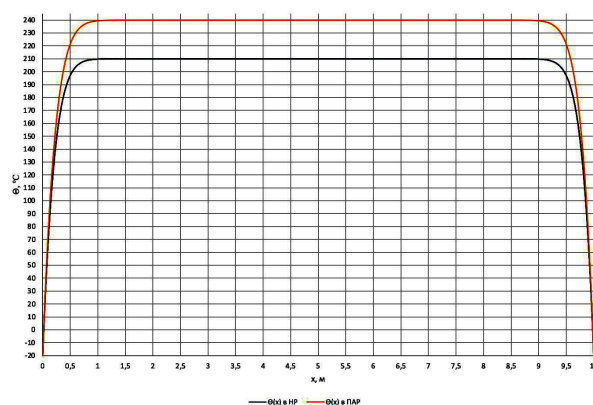


Рис. 14. Распределение температуры по длине линии (10 м) в разных режимах провода G(Z)TACSR 240 для $t = 674$ с (НР), $t = 792$ с (ПАР)

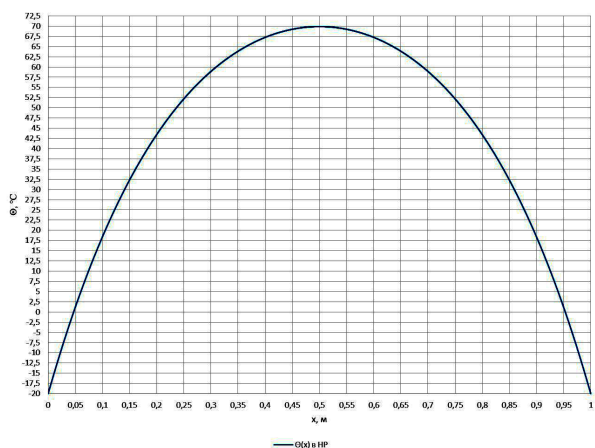


Рис. 13. Распределение температуры по длине линии (1 м) в разных режимах провода AC-240/32 для $t = 1000$ с (НР)

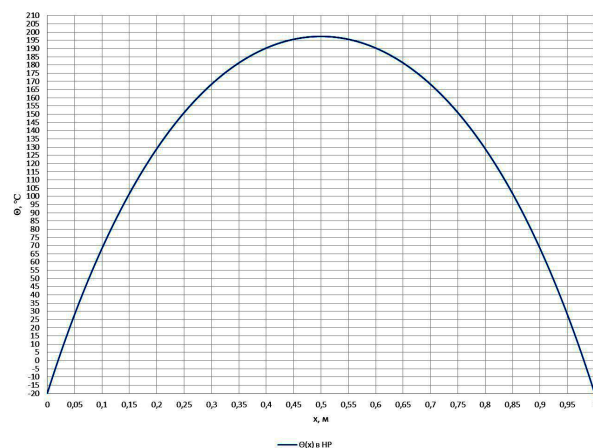


Рис. 15. Распределение температуры по длине линии (1 м) в разных режимах провода G(Z)TACSR 240

Таблица 2

Максимальные температуры и потери активной мощности в линиях

Марка провода	Длина ВЛ, м	Повышенный ток $I_{пов}'$, А	$\alpha_{вын}$ [4]	$\Theta_{пр}$ [4], °C	$a_{пл}$ [9]	Метод конечных разностей		Аналитическое решение по [6]		погрешность $\epsilon_{\Delta P1}'$, %
						Θ_{max}' , °C	$\Delta P1$ при $t = \infty$, кВт	Θ_{max}' , °C	$\Delta P2$ при $t = \infty$, кВт	
AC-240/32	5	1027	22,3	62,28	25,837	62,28	2,164	62,358	2,165	0,05
	10	1198		102,45	26,689	102,45	6,65	103,33	6,67	0,3
	100	1369		155,11	28,038	155,11	99,95	160,1	101,2	1,25
G(Z) TACSR 240	5	1459	22,73	199,1	29,813	199,1	6,34	200,82	6,36	0,32
	10	1592		254,52	31,826	254,52	16,96	262,52	17,23	1,59
	100	1725		313,1	34,371	313,1	222,3	335,99	231,3	4,05

тическую модель для определения температуры нагрева контактных соединений.

Библиографический список

1. Горюнов В. Н., Кропотин О. В., Шепелев А. О., Ткаченко В. А., Гиршин С. С., Троценко В. М. Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры // Омский научный

вестник. 2018. № 6 (162). С. 41 – 49. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-41-49. EDN: YSWODB.

2. Гиршин С. С., Шепелев А. О. Разработка усовершенствованных методов расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений ВЛ // Электрические станции. 2019. № 11 (1060). С. 44 – 54. EDN: LWEVHS.

3. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бигун А. Я. [и др.]. Расчет динамических процессов нагрева воздушных линий электро-

передачи на основе квадратичной модели теплообмена // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 2. С. 60–67. EDN: XBFJKL.

4. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Ляшков А. А. [и др.]. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 218.

5. Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A. [et al.]. Comparative analysis of insulation-covered and bare conductors of overhead lines with variation of load currents considering weather conditions // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819012.

6. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бигун А. Я. Расчет нестационарных температурных режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 287. EDN: SZVMIP.

7. Bigun A. Y., Girshin S. S., Goryunov V. N. [et al.]. Assessment of climatic factors influence on the time to reach maximum wire temperature of overhead power lines // Przegląd Elektrotechniczny. 2020. № 96 (8). P. 39–42. DOI: 10.15199/48.2020.08.08.

8. Bhattarai B. P., Gentle J. P., McJunkin T. [et al.]. Improvement of transmission line ampacity utilization by weather-based dynamic line rating // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. № 33 (4). P. 1853–1863. DOI:10.1109/TPWRD.2018.2798411.

9. Троценко В. М., Гиршин С. С., Петрова Е. В. [и др.]. Математическая модель теплового режима воздушной ли-

нии электропередачи с учетом изменения температуры по длине // iPolytech Journal. 2022. № 26 (3). С. 519–531. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-519-531.

10. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1977. 656 с. ISBN 5-02-014576-9.

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета, г. Омск.
SPIN-код: 3958-5882
AuthorID (РИНЦ): 889516
ORCID: 0000-0002-4250-371X
AuthorID (SCOPUS): 57210208434
Адрес для переписки: troch_93@mail.ru

Для цитирования

Троценко В. М. Анализ температуры и сравнение потерь активной мощности в нестационарном и стационарном тепловом режиме воздушных линий электропередачи // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 93–99. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-93-99.

Статья поступила в редакцию 15.05.2023 г.
© В. М. Троценко

UDC 621.315
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-93-99
EDN: WIGOVE

V. M. TROTSSENKO

Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia

TEMPERATURE ANALYSIS AND COMPARISON OF ACTIVE POWER LOSSES IN NON-STATIONARY AND STATIONARY THERMAL CONDITIONS OF OVERHEAD POWER LINES

The article considers the temperature distribution with increased currents in the non-stationary thermal regime of overhead power lines. The temperature distribution along the length of the line for wires of AC-240/32 and G(Z)TACSR 240 grades is constructed. Temperature dependences on time are plotted. The practical value of the mathematical model considered in the article lies in determining the maximum temperatures of overhead lines of different sections in normal or post-emergency wire mode. A comparative analysis of active power losses in a stationary thermal regime is carried out with and without taking into account axial heat transfer. The comparison showed that taking into account the axial heat transfer refines the active power losses, which allows introducing measures to reduce these losses with greater accuracy.

Keywords: power loss, bare wire, non-stationary thermal regime, stationary thermal regime, wire temperature, heat equation, axial heat transfer, finite difference method.

References

1. Goryunov V. N., Kropotin O. V., Shepelev A. O., Tkachenko V. A., Girshin S. S., Trotsenko V. M. Uproshchennaya formula dlya nagruzochnykh poter' aktivnoy moshchnosti v liniyakh elektroperedachi s uchetom temperatury [Simplified formula for active power load losses in transmission lines taking into account temperature dependence] // Omskiy Nauchnyy Vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 6 (162). P. 41–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-41-49. EDN: YSWODB. (In Russ.).
2. Girshin S. S., Shepelev A. O. Razrabotka usovershenstvovannykh metodov rascheta ustanovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem s uchatom temperaturnoy zavisimosti aktivnykh soprotivleniy VL [Development of improved methods for calculating steady-state modes of power systems taking into account the temperature dependence of the active resistances of overhead transmission lines] // Elektricheskiye Stantsii. *Electric Stations*. 2019. No. 11 (1060). P. 44–54. EDN: LWEVHS. (In Russ.).
3. Girshin S. S., Goryunov V. N., Bigun A. Y. [et al.]. Raschet dinamicheskikh protsessov nagreva vozdukhnykh liniy elektroperedachi na osnove kvadrachnoy modeli teploobmena [Calculation of dynamic processes of heating overhead transmission lines based on a quadratic heat transfer model] // Dinamika Sistem, Mekhanizmov i Mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2016. No. 2. P. 60–67. EDN: XBFJKL. (In Russ.).
4. Petrova E. V., Girshin S. S., Lyashkov A. A. [et al.]. Analiticheskoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provoda vozdukhnoy linii v usloviyakh vyzhdennoy konveksii [Analytical solution of the heat balance equation for an overhead line wire under conditions of forced convection] // Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya. *Modern Problems of Science and Education*. 2015. № 1–1. P. 218. (In Russ.).
5. Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A. [et al.]. Comparative analysis of insulation-covered and bare conductors of overhead lines with variation of load currents considering weather conditions // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819012. (In Engl.).
6. Girshin S. S., Goryunov V. N., Bigun A. Ya. Raschet nestatsionarnykh temperaturnykh rezhimov vozdukhnykh liniy elektroperedachi s uchatom nelineynosti protsessov teploobmena [Calculation of non-stationary temperature regimes of overhead power lines, taking into account the nonlinearity of heat transfer processes] // Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya. *Modern Problems of Science and Education*. 2014. No. 5. P. 287. EDN: SZVMIP. (In Russ.).
7. Bigun A. Y., Girshin S. S., Goryunov V. N. [et al.]. Assessment of climatic factors influence on the time to reach maximum wire temperature of overhead power lines // Przegląd Elektrotechniczny. *Electrotechnical Review*. 2020. No. 96 (8). P. 39–42. DOI: 10.15199/48.2020.08.08. (In Engl.).
8. Bhattarai B. P., Gentle J. P., McJunkin T. [et al.]. Improvement of transmission line ampacity utilization by weather-based dynamic line rating // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. No. 33 (4). P. 1853–1863. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2798411. (In Engl.).
9. Trotsenko V. M., Girshin S. S., Petrova E. V. [et al.]. Matematicheskaya model' teplovogo rezhima vozdukhnoy linii elektroperedachi s uchatom izmeneniya temperatury po dline [Mathematical model of the thermal regime of an overhead power line, taking into account temperature changes along the length] // iPolytech Journal. *iPolytech Journal*. 2022. No. 26 (3). P. 519–531. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-519-531. (In Russ.).
10. Samarskiy A. A. Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow, 1977. 656 p. ISBN 5-02-014576-9. (In Russ.).

TROTSSENKO Vladislav Mikhaylovich, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University, Omsk.
 SPIN-code: 3958-5882
 AuthorID (RSCI): 889516
 ORCID: 0000-0002-4250-371X
 AuthorID (SCOPUS): 57210208434
 Correspondence address: troch_93@mail.ru

For citations

Trotsenko V. M. Temperature analysis and comparison of active power losses in non-stationary and stationary thermal conditions of overhead power lines // Omsk Scientific Bulletin. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 93–99. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-93-99

Received May 15, 2023.

© V. M. Trotsenko



РАЗРАБОТКА СПОСОБА СЕЛЕКТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНИИ С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЕЙ 6–35 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ПРЕОБЛАДАНИИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

В данной работе представлен способ определения отходящей линии с однофазным замыканием на землю для сетей 6–35 кВ с преобладанием несинусоидальных нагрузок. В работе поднимается актуальность вопроса применения математического аппарата вейвлет-преобразования применительно к традиционным методам определения места повреждения. Применение вейвлет-аппарата особенно актуально в задачах декомпозиции несинусоидального сигнала тока отходящих линий, обусловленного наличием в нагрузках современных предприятий нефтедобывающего сектора ХМАО-Югры нелинейных потребителей. Предлагается модернизация существующих алгоритмов относительного замера уровня высших гармоник в параметрах аварийного режима. Предложенный метод позволяет определить отходящую линию по суммарной энергии спектра высших гармоник для различных конфигураций сети.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, вейвлет-преобразование, декомпозиция сигнала, энергия спектра, высшие гармоники.

Введение. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра является основным нефтегазоносным регионом России, а также одним из крупнейших нефтедобывающих регионов мира [1]. Стоит также отметить ряд особенностей функционирования энергетической системы данного региона, изложенных в [2], где в качестве крупнейших потребителей электроэнергии отмечается преобладание установок для добычи полезных ископаемых. А значит, можно сделать вывод о том, что наибольшая протяженность воздушных линий электропередачи соответствует классам напряжения 6 (10) кВ, что подтверждается [2, с. 28]. Как правило, такие сети работают в режиме изолированной, либо компенсированной нейтрали.

Важно будет упомянуть, что, в отличие от европейской части страны с преобладанием кабельных сетей [3], для ХМАО – Югры характерна большая протяженность воздушных линий электропередачи вне населенных пунктов.

В качестве подавляющего числа аварий распределительных сетей 6 (10) кВ с изолированной и компенсированной нейтралью принято выделять однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) [4]. Данная проблема существует на протяжении достаточно большого промежутка времени [5], однако она до настоящего времени остается актуальной ввиду невозможности предоставить универсальное реше-

ние, успешно функционирующее в различных конфигурациях сетей.

Для идентификации аварий подобного рода на практике нашли применение несколько типов методов определения места повреждения (ОМП) линии. Наибольшей точностью обладают топографические методы, которые предполагают обход трассы с соответствующим прибором и не могут быть использованы в труднопроходимой местности и в условиях большой протяженности линий электропередачи. Кроме того, в [6] авторами отмечается, что топографические методы применяют оперативно-выездные службы и к работе релейной защиты и автоматики (РЗА) отношения данные методы не имеют, соответственно, в данной работе рассматриваться не будут.

Классификация дистанционных методов ОМП вариативна, однако считаем необходимым отметить в соответствии с [7] применение для ВЛ следующих методов: **импульсный** (подразделяется на локационный и волновой), где зондирующий импульс напряжения, отражаясь от места повреждения, возвращается к месту отправления [8]; **электрохимический метод**, суть которого состоит в «выбрасывании» блинкеров от механических усилий токов замыкания [9]; **ОМП** по параметрам аварийного режима (ПАР), которые принято подразделять на односторонние [10] и двусторонние [11]. Последняя груп-

па методов находит особую популярность в связи с развитием вычислительных мощностей и возможности применения нового математического аппарата с целью повышения точности ОМП [12].

Авторами работы [13] отмечается, что в процессе перехода предприятий нефтегазового сектора к современным статическим преобразователям частоты в качестве побочного эффекта наблюдается искажение высшими гармониками токов и напряжений силового канала оборудования. Аналогичное утверждение об источнике высших гармоник делается в [14]. Это обуславливается тем, что, как правило, подобные устройства реализуются с использованием полупроводниковой элементной базы (большим количеством транзисторов, тиристоров и т.п.), а также автономных инверторов напряжения, для которых характерно наличие широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Исследованию гармонических составляющих в сетях 6 (10) кВ также посвящены работы [15] и [16], где авторами отмечается: «токи высших гармонических составляющих могут увеличивать токи однофазного замыкания на землю в несколько раз».

В то же время, как отмечается в работе [17], «высшие гармоники представляют собой широкий информационный базис для защит от однофазных замыканий на землю». Однако вместе с этим автором отмечается сложность в технической реализации измерения высших гармоник в условиях неопределенности сигнала и преобладания в нем основной частоты [17, с. 1], аналогичное замечание имеется в работе [18].

С целью идентификации высших гармоник (ВГ) и оценки их уровня в мировом опыте получило широкое распространение преобразование Фурье. Однако неоднократно рассматривался вопрос о повышении точности и быстродействия подобных систем за счет использования более совершенного математического аппарата и алгоритмов. Так, например, в работе [19] предлагается использовать подход адаптивного структурного анализа. Интеллектуальная защита сети от однофазных замыканий на землю с использованием самообучающегося агента представлена в статье [20]. Также в задачах определения места повреждения находят применение другие нейросетевые технологии и алгоритмы нечеткой логики [21]. Авторами работы [22] произведен анализ однофазного замыкания на землю с использованием быстрого преобразования Фурье и противопоставления ему математического аппарата вейвлет-анализа.

Вейвлет-анализ в последние годы нашел применение и продолжает набирать популярность при решении энергетических задач [23], в том числе при определении места повреждения линии электропередачи, свидетельством данного факта могут служить работы [24, 25].

Постановка задачи. Для восстановления нормальной работы системы электроснабжения в случае возникновения ОЗЗ рекомендуется отключать линию с замыканием на землю как можно быстрее, произвести поиск места повреждения и устранить его. Однако допускается эксплуатация линии в течение нормируемого промежутка времени, равного двум часам, в течение которых замыкание может существовать [26]. Ранее уже отмечалось, что замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью не отключаются релейными защитами линий ввиду малых емкостных токов. Такое повреждение только сигнализируется на питающей подстанции за счет

изменения фазных напряжений на всех присоединениях, подключенных к одному силовому трансформатору. Следовательно, перед тем как приступить к процессу ОМП, необходимо предварительно селективно определить отходящую линию с ОЗЗ.

От метода, с помощью которого должна быть определена отходящая линия с ОЗЗ, в свою очередь, зависит оперативность и точность получения данных о месте повреждения, которые способствуют быстрому устранению повреждения и, следовательно, повышению надежности энергоснабжения потребителей без риска выхода оборудования из строя. Соответственно, разработка имитационных моделей сети, их исследование, а также создание и модификация методов селективного определения отходящей линии с ОЗЗ для сетей 6–35 кВ является актуальной задачей.

Одним из принципов исполнения устройств защиты от ОЗЗ является использование высших гармонических составляющих токов I_0 и напряжения U_0 установившегося режима ОЗЗ. Причем, если ряд нечетных высших гармоник не компенсируется дугогасящим реактором (ДГР), «то по отношению к высшим гармоникам электрическую сеть с заземлением нейтрали через ДГР можно рассматривать с достаточной степенью точности как сеть с изолированной нейтралью» [6, с. 35]. Целью настоящего исследования является модернизация существующего способа относительного замера уровня высших гармоник в токе I_0 с помощью вейвлет-преобразования для селективного определения отходящей линии с ОЗЗ.

Теория. Для реализации существующих методов относительного замера высших гармоник в действующих устройствах применяется аппаратная фильтрация сигнала. Методы вейвлет-преобразования позволяют осуществлять программную фильтрацию (выделять интересующий спектр) и производить расчет энергии спектра, используя вейвлет-коэффициенты, занимающие значительно меньшие объемы информации, чем исходный сигнал. Предлагается осуществить анализ установившегося режима однофазного замыкания на землю на предмет наличия в токах отходящих линий высших гармоник. Иными словами, определить относительный уровень высших гармоник, наибольшее значение которых будет соответствовать поврежденному ответвлению ВЛ в соответствии с [27]. Основное преимущество вейвлет-анализа заключается в возможности производить цифровую фильтрацию и сжатие сигналов. Для этого достаточно обнулить вейвлет-коэффициенты, отвечающие за соответствующий частотный диапазон.

Для получения вейвлет-коэффициентов из одномерного массива тока необходимо осуществить свертку исходного сигнала $i(t)$ и вейвлет-функции $\Psi(t)$ по составляющим в различных масштабах и частотных диапазонах.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int i(t) \psi\left(\frac{t}{a} - nb\right) dt.$$

Здесь a — нормирующий коэффициент, задающий ширину вейвлет-пакета, b — коэффициент, определяющий его положение. Необходимо отметить, что a и b могут принимать только дискретные значения $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, где $m, n \in \mathbb{Z}$.

В данной работе реализацию декомпозиции сигнала предлагается осуществлять с использованием

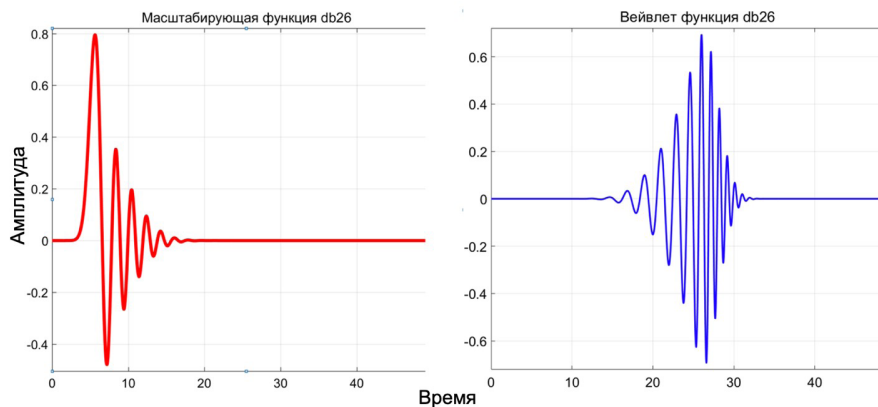


Рис. 1. Масштабирующая функция и вейвлет Добеши

вейвлета Добеши 26 порядка, что обуславливается точностью данного вида вейвлет-преобразования. Масштабирующая функция $\varphi(t)$ и вейвлет $\Psi(t)$ для которого представлены на рис. 1.

Принято связывать масштабирующую функцию и вейвлет одного уровня с масштабирующей функцией на более низком уровне посредством фиксированного количества коэффициентов $h_0(k)$ и $h_1(k)$:

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k),$$

$$\psi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k).$$

Первый уровень вейвлет-коэффициентов можно получить из произведения исходного сигнала тока на масштабирующую функцию $\varphi(t)$, которая сдвинута вдоль оси времени таким образом, чтобы полностью покрывать исходный сигнал тока. В результате преобразования удастся получить аппроксимирующие коэффициенты первого уровня разложения $i_{1,k}^A$. Аналогично можно получить значения детализирующих коэффициентов $i_{1,k}^D$, найдя произведение с вейвлетом $\Psi(t)$. В случае необходимости разложения на последующие уровни необходимо получить новое семейство отмасштабированных и сдвинутых функций $\varphi(t)$ и $\Psi(t)$.

$$\begin{cases} i_{j,k}^A = \sum_k h_0(2t - k) i_{j-1,k}^A \\ i_{j,k}^D = \sum_k h_1(2t - k) i_{j-1,k}^A \end{cases}$$

Проиллюстрируем процесс пакетного вейвлет-преобразования для одномерного массива сигнала тока на примере рис. 2.

Соответственно, дискретный сигнал тока можно представить в виде суммы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов в выбранной частоте дискретизации по следующей формуле:

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k_m} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{k_m} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t).$$

Здесь j — выбранная глубина разложения, N — количество отсчетов сигнала, а J — максимально возможный уровень разложения, определяемый как

$$J = \log_2 N.$$

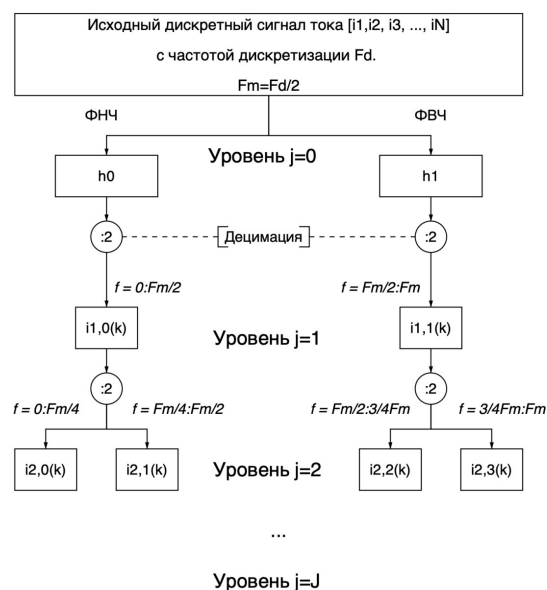


Рис. 2. Схема пакетного вейвлет-преобразования

Энергетические характеристики исходного сигнала тока можно определить на основании равенства Парсеваля и найденных вейвлет-коэффициентов:

$$E_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2.$$

В отличие от вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Хаара преимущество «семейства» вейвлетов Добеши состоит в том, что для каждого члена этого семейства достаточно указать только коэффициенты фильтра нижних частот g_k , определяемых как

$$g_k = (-1)^k \cdot h_{1-k}.$$

Кроме того, для данного типа вейвлетов необходимо определять только масштабирующую функцию, которая связывается с вейвлетом следующим выражением:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{k_m} g_k \varphi(2t - k).$$

Результаты. Задачу селективного определения отходящей линии с однофазным замыканием

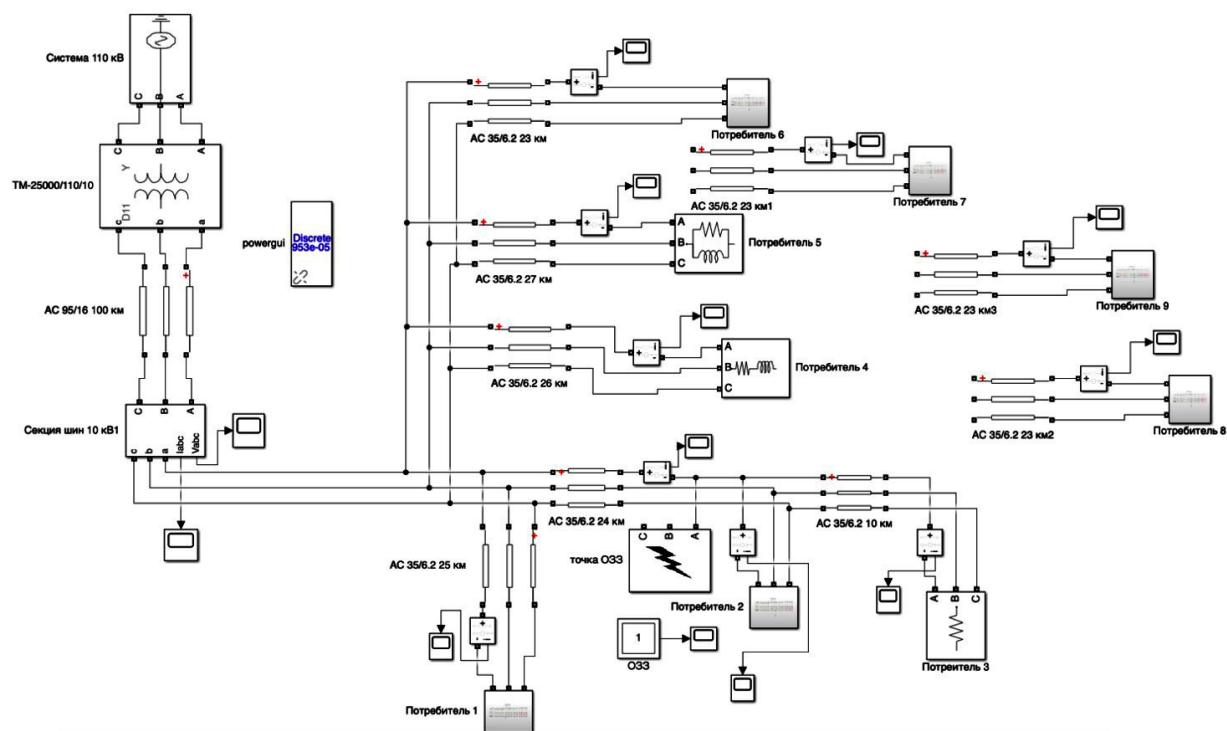


Рис. 3. Имитационная модель сети в Matlab Simulink

Таблица 1

Паспортные данные трансформатора ТРДН 25000/110

$U_{ВН'}$, кВ	$U_{НН'}$, кВ	$S_{НОМ'}$, кВА	$\Delta P_{XX'}$, кВт	$\Delta P_{КЗ}$, кВт	$U_{КЗ'}$, %
115	10	25000	17	120	10,5

Таблица 2

Суммарные значения энергии спектра (о.е.) токов отходящих линий, полученные в результате вейвлет-преобразования

№ эксп-та Отх. линия	1	2	3	4	5	6
Потребитель 1	$1,2 \cdot 10^2$	$7,1 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$
Потребитель 2	—	—	—	—	—	$9,8 \cdot 10^8$
Потребитель 6	$1,2 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$
Потребитель 7	—	—	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$
Потребитель 8	—	—	—	—	$6,1 \cdot 10^6$	$6,1 \cdot 10^6$
Потребитель 9	—	—	—	—	$1,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$
Линия с ОЗЗ	$7,1 \cdot 10^4$	$1,54 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$

на землю предлагается реализовать с использованием компьютерного моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink. Так, на рис. 3 представлена имитационная модель промышленной сети с односторонним питанием, которая состоит из понижающего трансформатора ТРДН 25000/110-6(10), параметры схемы замещения которого определены по известной методике в соответствии с паспортными данными из табл. 1.

Распределенные параметры трехпроводной воздушной линии напряжением 10 кВ определены

в соответствии с методом зеркальных отображений [28] при использовании поднастройки блока powergui — power line parameters. Допустимые типы проводов, геометрия их расположения и сечения приняты согласно [29].

Модель включает в себя девять отходящих линий к трем, из которых подключены потребители с линейной вольтамперной характеристикой; для остальных имеется возможность задавать параметры гармонических составляющих, которые оказывают влияние на энергосистему. В одной из этих

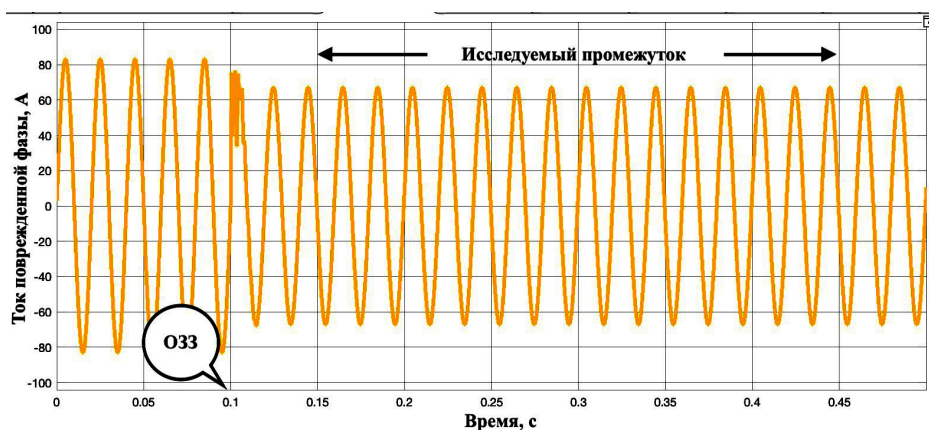


Рис. 4. Осциллограмма тока в поврежденной фазе при синусоидальной нагрузке (эксперимент 1)

линий располагается точка ОЗЗ, которая для всех экспериментов остается неизменной.

В качестве подтверждения предложенной ранее гипотезы необходимо определить энергию спектра каждой отходящей линии и осуществить их сравнение. В отходящей линии с наличием ОЗЗ значение спектральной плотности сигнала должно быть больше остальных.

Для решения поставленной в данной работе задачи выбрана глубина разложения j до 8-го уровня. Частота дискретизации принята равной 51,2 кГц ($953 \cdot 10^{-5}$ с) согласно условиям теоремы Котельникова и требованиям к максимально возможному уровню вейвлет-разложения.

В результате имитационного моделирования проведена серия вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в табл. 2.

В процессе расчета осуществлялось пакетное вейвлет-преобразование участка установившегося режима ОЗЗ (рис. 4) тока отходящих линий и вычисление вейвлет-коэффициентов, а также соответствующей им суммы энергии спектра высших гармоник.

Эксперимент 1 проведен для начальной инициализации модели. Нагрузка задана линейными потребителями 1 и 6. Действующие значения токов основной частоты 160 А и 60 А соответственно. Потребители 4 и 5 представлены активной нагрузкой 300 кВт. Прочие нагрузки отсутствуют.

Эксперимент 2 подразумевает изменение гармонического состава токов нагрузок потребителей 1 и 6. Помимо токов основной частоты для потребителей 1 и 6 характерно наличие третьей гармоники. Действующие значения токов с частотой 150 Гц заданы 53 А и 20 А соответственно. Конфигурация сети аналогична эксперименту 1.

Эксперимент 3 предполагает изменение конфигурации сети. К линии, питающей потребителя 6 из предыдущего эксперимента дополнительно присоединяется ВЛ, которая питает нелинейного потребителя 7. Токи нагрузки в данном ответвлении содержат в своем составе 1, 3, 5 и 7 гармоники с действующими значениями 150, 50, 30 и 21 А соответственно.

В **эксперименте 4** осуществим смену характера нагрузок для потребителей 4 и 5 с активного на активно-индуктивный с $\cos \varphi = 0,8$. Конфигурация сети и ее параметры аналогичны эксперименту 3.

Для выполнения **эксперимента 5** в качестве дополнительных ответвлений линий, питающих потребителей 4 и 5, присоединим дополнительные ВЛ, которые осуществляют питание нелинейных потребителей 8 и 9. Спектральный состав токов включает 3, 5, 7 и 9 гармоники с действующими значениями 140, 93, 70 и 46 А.

В **эксперименте 6** рядом с местом ОЗЗ создается дополнительное ответвление ВЛ, к которому присоединен потребитель 2. Ток нагрузки данного присоединения характеризуется наличием 1, 3, 5, 7, 9 и 11 гармоник.

По результатам сравнительного анализа суммарных значений энергии спектра высших гармоник в отходящих линиях можно заметить, что вне зависимости от типа эксперимента и конфигурации сети концентрация максимальной энергии, определенной из вейвлет-коэффициентов, соответствует поврежденной линии. Представленный расчет подтверждает возможность реализации алгоритма относительного замера высших гармоник для селективного определения линии с ОЗЗ, используя энергию спектра вейвлет-коэффициентов.

Закключение. Разработка методов селективного определения отходящей линии с ОЗЗ для сетей 6–35 кВ по-прежнему остается актуальной задачей. Современное развитие вычислительной техники позволяет использовать для этих целей вейвлет-преобразование, с помощью которого возможно осуществлять программную фильтрацию токов отходящих линий, а также по найденным вейвлет-коэффициентам осуществлять вычисление энергии спектра высших гармоник. Результаты работы могут быть использованы для организации цифровых алгоритмов для защиты и сигнализации об однофазных замыканиях на землю в распределительных сетях 6–35 кВ при наличии несинусоидальной нагрузки.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Разработка моделей вейвлет-анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей», код темы: FENG-2023-0005).

1. Экономика ХМАО—Югры // Официальный сайт полномочного представителя Президента Российской Федерации в Уральском федеральном округе. URL: http://uralfo.gov.ru/district/KHM/hmao_есonomy/ (дата обращения: 30.05.2023).
2. Схема и программа развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа — Югры на период до 2025 года // Департамент жилищно-коммунального комплекса и энергетики Ханты-Мансийского автономного округа—Югры. URL: <https://docs.cntd.ru/document/570863613> (дата обращения: 14.06.2023).
3. Шуин В. А., Винокурова Т. Ю., Шагурина Е. С. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Вестник ИГЭУ. 2013. № 6. С. 35–41. EDN: RRYZSX.
4. Медведева М. А., Кузьмин С. В., Кузьмин И. С., Шманев В. Д. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприемников 6–10 кВ в горной отрасли // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10, № 2. С. 120–125.
5. Шуин В. А., Гусенков А. В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. Москва: НТФ «Энергопресс», 2001. 104 с.
6. Аржанников Е. А., Чухин А. М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. Москва: НТФ «Энергопресс», 1998. 87 с.
7. СТО 34.01-4.1-001-2016. Устройства определения места повреждения воздушных линий электропередачи. Общие технические требования. Введ. 2016–07–04. ПАО «Россети», 2016. 20 с.
8. Куликов А. Л., Мисриханов М. Ш., Петрухин А. А. Определение мест повреждений ЛЭП 6–35 кВ методами активного зондирования Москва: Энергоатомиздат, 2009. 164 с. ISBN 978-5-283-03292-4.
9. Куликов А. Л., Вуколов В. Ю., Шарыгин М. В., Бездушный Д. И., Темирбеков Ж. Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 29–38.
10. Солдатов В. А., Климов Н. А., Яблоков А. С. Определение места повреждения в электрических сетях 35–10–6 кВ по эмпирическим критериям в координатах трех симметричных составляющих // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 3. С. 32–38. DOI: 10.14529/power220304.
11. Лачугин В. Ф., Панфилов Д. И., Смирнов А. Н., Платонов П. С. Определение мест повреждений воздушных линий высокого напряжения с использованием спутниковой связи. Волновой метод двусторонних синхронизированных измерений // Энергия единой сети. 2017. № 2 (31). С. 30–41.
12. Абрамочкина Л. В. Повышение точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам предаварийного и аварийного режимов: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 167 с.
13. Кликушин Ю. Н., Птицына Е. В., Сорокин В. Н. Исследование потерь электрической энергии, вызванных наличием высших гармоник в напряжениях и токах силового канала преобразования энергии установок электроцентробежных насосов // Известия Транссиба. 2012. № 2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-poterelektricheskoy-energii-vyzvannyh-nalichiem-vysshih-garmonik-v-napryazheniyah-i-tokah-silovogo-kanala> (дата обращения: 12.03.2023).
14. Костин В. Н., Кривенко А. В., Сериков В. А. Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 5. С. 431–441.
15. Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Дрей Н. М. Алгоритм расчёта тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 40–45.
16. Авербух М. А., Прасол Д. А. Оценка влияния высших гармоник на токи однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением 6–10 кВ // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2 (14). С. 26–40. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26. EDN: DFXIEQ.
17. Солдатов А. В., Кудряшова М. Н., Антонов В. И. [и др.] Методы распознавания высших гармоник на фоне доминирующего гармонического шума для целей защиты от однофазного замыкания на землю // Электрические станции. 2021. № 7 (1080). С. 27–34. EDN: DCFFXI.
18. Antonov V. I., Naumov V. A., Soldatov A. V. [et al.] Recognition of Weak Harmonic Signal Components in Generator Protection Against Single-Phase Earth Fault // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52, № 2. DOI: 10.1007/s10749-018-0937-x.
19. Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике: моногр. Чебоксары: Чувашский гос. ун-т имени И. Н. Ульянова, 2018. 334 с. EDN: UWMDAS. ISBN 978-5-7677-2571-7.
20. Шилин А. Н., Дикарев П. В., Дементьев С. С. Интеллектуальная система релейной защиты воздушных линий в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю // Глобальная ядерная безопасность. 2022. № 4 (45). С. 40–53. DOI: 10.26583/gns-2022-04-04.
21. Touati K. O. M., Merzouk I., Hafaifa A. [et al.]. Intelligent fault diagnosis of power transmission line using fuzzy logic and artificial neural network // Diagnostyka. 2022. Vol. 23, № 4. DOI: 10.29354/diag/156495.
22. Осипов Д. С., Долгих Н. Н., Сатпаев Д. С., Андреева Е. Г. Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-76-81. EDN: VLUNZH.
23. Пат. 2632989 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Способ и устройство для определения местонахождения однофазного замыкания на землю в распределительной сети на основе вейвлет-преобразования переходных сигналов / Ц. Му, Ц. Ван, И. Ван [и др.] № 2015119649; заявл. 08.11.13; опубл. 11.10.17. Бюл. № 29.
24. Xu Y., Liu Y., Xing Y. [et al.]. Power Network Fault Location Using Traveling Waves and Continuous Wavelet Transform // 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Denver. CO. USA. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM48719.2022.9916846.
25. Shabangu M., Roux P. Le, Jordaan J. [et al.]. Fault Location Detection in Underground Cables based on Wavelet-ANFIS Approach // 2021 IEEE PES/IAS Power Africa. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543184.
26. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Москва: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. 549 с.
27. Добрягина О. А., Тютиков В. В., Шадрикова Т. Ю. [и др.]. Способ выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью // Вестник ИГЭУ. 2019. № 5. С. 31–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.031-039.
28. Пацюк В. И., Берзан В. П., Рыбакова Г. А. Математическая модель трехфазной электрической линии с расщепленными фазами // Проблемы региональной энергетики. 2019. № S1-3 (42). С. 53–67. DOI: 10.5281/zenodo.3239218. EDN: XVCDSV.
29. Серия 3.407.1-143. Железобетонные опоры ВЛ 10 кВ. Типовые строительные конструкции, изделия, узлы. Введ. 1989–01–07. Сельэнергопроект, 1989. 60 с.

ПАРАМЗИН Александр Олегович, преподаватель
Политехнической школы Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.
SPIN-код: 2889-8437
AuthorID (РИНЦ): 1021763
ORCID: 0000-0002-7266-4493
AuthorID (Scopus): 6504763711
Адрес для переписки: a_paramzin@ugrasu.ru

Парамзин А. О. Разработка способа селективного определения линии с однофазным замыканием на землю для промышленных сетей 6–35 кВ с изолированной нейтралью при преобладании несинусоидальной нагрузки // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 100–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-100-108.

Статья поступила в редакцию 26.06.2023 г.
© А. О. Парамзин

UDC 621.31
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-100-108
EDN: WIUEEM

A. O. PARAMZIN

Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia

DEVELOPMENT OF SELECTIVE LINE DETECTION METHOD WITH SINGLE-PHASE EARTH FAULT FOR INDUSTRIAL 6–35 KV NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL WITH NON-SINUSOIDAL LOAD

This paper presents a method for determining the outgoing line with a single-phase fault for 6–35 kV networks with a non-sinusoidal loads. The paper considers the relevance of applying the mathematical apparatus of the wavelet transform together with the traditional methods of fault location. The application of the wavelet is relevant in the problems of decomposition of non-sinusoidal current signal of outgoing lines. This is due to the loads of modern enterprises of the oil producing sector of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra. It is proposed to modernize the existing algorithm for relative measurement of the level of higher harmonics. The proposed method makes it possible to determine the outgoing line by the total energy of the spectrum of higher harmonics for different network configurations.

Keywords: single-phase faults, wavelet transform, signal decomposition, spectrum energy, higher harmonics.

Acknowledgments

The research is done within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject: «Development of models of wavelet analysis of nonstationary modes of electric networks to improve the reliability and efficiency of power supply to consumers», subject code: FENG-2023-0005).

References

1. Ekonomika KHAMAO-Yugry [Economy of Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra] // Ofitsial'nyy sayt polnomochnogo predstavatelya Prezidenta Rossiyskoy Federatsii v Ural'skom federal'nom okruge. *Official website of the Plenipotentiary Representative of the President of the Russian Federation in the Urals Federal District*. URL: http://uralfo.gov.ru/district/KHM/hmao_economy/ (accessed: 30.05.2023). (In Russ.).

2. Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry na period do 2025 goda [Scheme and program of the electric power industry development in Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Ugra for the period till 2025] // Departament zhilishchno-kompleksa i energetiki Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry. *Department of housing and energy sector of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Ugra*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/570863613> (accessed: 14.06.2023). (In Russ.).

3. Shuin V. A., Vinokurova T. Yu., Shagurina E. S. Matematicheskaya model' dlya otsenki minimal'nogo urovnya vysshikh garmonik v toke odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kompensirovannykh setyakh 6–10 kV [Mathematical model for estimating the minimum level of higher harmonics in the single-phase earth-fault current in compensated 6–10 kV networks] // *Vestnik IGEU. Vestnik IGEU*. 2013. No. 6. P. 35–41. EDN: RRYZSX. (In Russ.).

4. Medvedeva M. L., Kuzmin S. V., Kuzmin I. S., Shmanev V. D. Analiz i prognoz avariynosti raspredelitel'nykh setey

i elektropriyemnikov 6–10 kV v gornoy otrasli [Analysis and forecast of accident rate of 6–10 kV distribution grids and power consumers in the mining sector Safety and Reliability of Power Industry] // Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki. *Safety and Reliability of Power Industry*. 2017. Vol. 10, no. 2. P. 120–125. (In Russ.).

5. Shuin V. A., Gusenkov A. V. Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow, 2001. 104 p. (In Russ.).

6. Arzhannikov E. A., Chukhin A. M. Metody i pribory opredeleniya mest povrezhdeniya na liniyakh elektropredachi [Methods and Instruments for Locating Faults on Electric Transmission Lines]. Moscow, 1998. 87 p. (In Russ.).

7. STO 34.01-4.1-001-2016. Ustroystva opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdukhnykh liniy elektropredachi. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [STO 34.01-4.1-001-2016. Devices for fault location of overhead power lines. General technical requirements]. PAO Rosseti, 2016. 20 p. (In Russ.).

8. Kulikov A. L., Misrikhanov M. S., Petrukhin A. A. Opredeleniye mest povrezhdeniy LEP 6–35 kV metodami aktivnogo zondirovaniya [Determination of fault locations on 6–35 kV power lines by active sensing methods]. Moscow, 2009. 164 p. ISBN 978-5-283-03292-4. (In Russ.).

9. Kulikov A. L., Vukolov V. Yu. V., Bezdushny D. I., Temirbekov J. Algorithm of fault location on a power line with branch lines [Fault location algorithm for a power line with taps] // Vestnik NGIEI. *Bulletin NGIEI*. 2017. No. 9 (76). P. 29–38. (In Russ.).

10. Soldatov V. A., Klimov N. A., Yablokov A. S. Opredeleniye mesta povrezhdeniya v elek- tricheskikh setyakh 35–10–6 kV po empiricheskim kriteriyam v koordinatakh trekh simmetrichnykh sostavlyayushchikh [Fault location in electric 35–10–6 kV networks according to empirical criteria in the coordinates of three symmetric components] // Vestnik YUUrGU. Seriya «Energetika». *Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»*. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 32–38. DOI: 10.14529/power220304. (In Russ.).

11. Lachugin V. F., Panfilov D. I., Smirnov A. N., Platonov P. S. Opredeleniye mest povrezhdeniy vozdukhnykh liniy vysokogo napryazheniya s ispol'zovaniyem sputnikovoy svyazi. Volnovoy metod dvustoronnykh sinkhronizirovannykh izmereniy [High voltage overhead lines fault location based on the wave bilateral synchronized measureme] // Energiya edinoy seti. *Energy of Unified Grid*. 2017. No. 2 (31). P. 30–41. (In Russ.).

12. Abramochkina L. V. Povysheniye tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdukhnykh liniy elektropredachi po parametram predavariynogo i avariynogo rezhimov [Increasing the accuracy of fault location of overhead power lines according to the parameters of pre-emergency and emergency modes]. Tomsk, 2014. 167 p. (In Russ.).

13. Klikushin Yu. N., Ptitsyna E. V., Sorokin V. H. Issledovaniye poter' elektricheskoy energii, vyzvannykh nalichiyem vysshikh garmonik v napryazheniyakh i tokakh silovogo kanala preobrazovaniya energii ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov [Study of electric energy losses caused by the presence of higher harmonics in the voltages and currents of the power converter channel of electric centrifugal pumps units] // Izvestiya Transsiba. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2012. No. 2 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-poter-elektricheskoy-energii-vyzvannykh-nalichiyem-vysshikh-garmonik-v-napryazheniyakh-i-tokakh-silovogo-kanala> (accessed: 12.03.2023). (In Russ.).

14. Kostin V. N., Krivenko A. V., Serikov V. A. Vliyaniye vysshikh garmonik na kachestvo napryazheniya i na rabotu kondensatornykh batarey v sistemakh elektrosnabzheniya s nelineynoy nagruzkoy [Influence of high harmonics on the quality of voltage and on the operation of capacitor banks in electric supply systems with non-linear load] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya*

Tula State University. Technical Sciences. 2020. No. 5. P. 431–441. (In Russ.).

15. Mikheev G. M., Atamanov M. N., Drey N. M. Algoritmt rascheta toka vysshikh garmonik v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Algorithm for calculating the current of higher harmonics in the power supply system of industrial enterprises] // Promyshlennaya energetika. *Industrial Energy*. 2018. No. 3. P. 40–45. EDN: XOWALR. (In Russ.).

16. Averbukh M. A., Prasol D. A. Otsenka vliyaniya vysshikh garmonik na toki odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu napryazheniyem 6–10 kV [Assessment of influence of higher harmonics on single-phase earth fault currents in 6–10 kV networks with isolated neutral] // Intelktual'naya elektrotehnika. *Smart Electrical Engineering*. 2021. No. 2 (14). DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_26. EDN: DFXIEQ. (In Russ.).

17. Soldatov A. V., Kudryashova M. N., Antonov V. I. [et al.] Metody raspoznavaniya vysshikh garmonik na fone dominiruyushchego garmonicheskogo shuma dlya tseley zashchity ot odnofaznogo zamykaniya na zemlyu [Methods for detecting higher harmonics against a background of dominant harmonic noise for the purpose of protection against single-phase ground faults] // Elektricheskkiye stantsii. *Electrical Stations*. 2021. No. 7 (1080). P. 27–34. EDN: DCFEXI. (In Russ.).

18. Antonov V. I., Naumov V. A., Soldatov A. V. [et al.] Recognition of Weak Harmonic Signal Components in Generator Protection Against Single-Phase Earth Fault // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52, no. 2. DOI: 10.1007/s10749-018-0937-x. (In Engl.).

19. Antonov V. I. Adaptivnyy strukturnyy analiz elektricheskikh signalov: teoriya i yeye prilozheniya v intellektual'noy elektroenergetike [Adaptive structural analysis of electrical signals: theory and its applications in intelligent power engineering] Cheboksary, 2018. 334 p. EDN: UWMDAS. ISBN 978-5-7677-2571-7. (In Russ.).

20. Shilin A. N., Dikarev P. V., Dementiev S. C. Intelktual'naya sistema releyonoy zashchity vozdukhnykh liniy v elektricheskikh setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents] // Global'naya yadernaya bezopasnost'. *Global Nuclear Security*. 2022. No. 4 (45). P. 40–53. DOI: 10.26583/gns-2022-04-04. (In Russ.).

21. Touati K. O. M., Merzouk I., Hafaifa A. [et al.]. Intelligent fault diagnosis of power transmission line using fuzzy logic and artificial neural network // Diagnostyka. 2022. Vol. 23, no. 4. DOI: 10.29354/diag/156495. (In Engl.).

22. Osipov D. S., Dolgikh N. N., Satpayev D. S., Andreeva E. G. Analiz rezhima odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v setyakh s kombinirovannym zazemleniyem neytrali s pomoshch'yu veyvlet-preobrazovaniya [Analysis of single-phase earth fault mode in networks with combined neutral ground by means of wavelet transformation] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 5 (161). P. 76–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-76-81. EDN: VLUZNH. (In Russ.).

23. Patent 2632989 Russian Federation, IPC G 01 R 31/08. Sposob i ustroystvo dlya opredeleniya mestonakhozhdeniya odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v raspredelitel'noy seti na osnove veyvlet-preobrazovaniya perekhodnykh signalov [Method and device for determining location of single-phase-to-ground fault in distributing networkbased on wavelet transformation of transitional signals] / TS. Mu, TS. Van, I. Van [et al.]. No. 2015119649. (In Russ.).

24. Xu Y., Liu Y., Xing Y. [et al.]. Power Network Fault Location Using Traveling Waves and Continuous Wavelet Transform // 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Denver. CO. USA. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM48719.2022.9916846. (In Engl.).

25. Shabangu M., Roux P. Le, Jordaan J. [et al.]. Fault Location Detection in Underground Cables based on Wavelet-ANFIS Approach // 2021 IEEE PES/IAS Power Africa. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543184.26. (In Engl.).

26. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules for Electrical Installations]. 7th ed. Moscow, 2007. 549 p. (In Russ.).

27. Dobryagina O. A., Tyutikov V. V., Shadrikova T. Yu. [et al.]. Sposob vypolneniya adaptivnoy tokovoy zashchity ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV s izolirovannoy neytral'yu [Method of adaptive current protection against earth faults in 6–10 Kv cable networks with an insulated neutral] // Vestnik IGEU. *Vestnik IGEU*. 2019. No. 5. P. 31–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.031-039. (In Russ.)

28. Patsyuk V. I., Berzan V. P., Rybakova G. A. Matematicheskaya model' trekhfaznoy elektricheskoy linii s rasshcheplyennymi fazami [Mathematical Model of a Three-Phase Electric Line with Split Phases] // Problemy regional'noy energetiki. *Problems of the Regional Energetics*. 2019. No. S1-3 (42). P. 53–67. DOI: 10.5281/zenodo.3239218. EDN: XVCDVS. (In Russ.).

29. Seriya 3.407.1-143. Zhelezobetonnyye opory VL 10 kV. Tipovyye stroitel'nyye konstruktsii, izdeliya uzly [Series 3.407.1-143. Reinforced Concrete Supports of 10 kV Overhead Line. Typical building structures, products assemblies]. Selenergoproekt, 1989. 60 p. (In Russ.).

PARAMZIN Alexander Olegovich, Lecturer at the Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 2889-8437

AuthorID (RSCI):1021763

ORCID: 0000-0002-7266-4493

AuthorID (SCOPUS): 6504763711

Correspondence address: a_paramzin@ugrasu.ru

For citations

Paramzin A. O. Development of selective line detection method with single-phase earth fault for industrial 6–35 kV networks with isolated neutral with non-sinusoidal load // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 100–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-100-108.

Received June 26, 2023.

© A. O. Paramzin

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ МИНИ-СЕТИ С УЧЕТОМ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ТЕРРИТОРИИ С РЕЗКО НЕОДНОРОДНЫМ ЛАНДШАФТОМ

В данной работе представлен метод определения оптимальной структуры изолированной электрической сети с учетом географических особенностей области, на которой она располагается. Отличительной особенностью метода является снятие ограничения с количества искомых равнозначных трасс линий электропередачи с последующей фильтрацией трасс с учетом технологических и технических ограничений. Таким образом, полученный метод можно использовать для организации микрогрид в удаленных от Единой национальной (общероссийской) энергетической сети районах с распределенной генерацией и нагрузкой.

Ключевые слова: децентрализованное электроснабжение, минигрид, микро-грид, оптимальная структура сети, трассировка линий электропередачи.

Введение. Согласно постановлению от 15 апреля 2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»» [1] большое внимание уделяется развитию инфраструктуры Дальнего Востока, Восточной Сибири, Арктической зоны Российской Федерации, Крымского полуострова и Калининградской области. Развитие инфраструктуры данных территорий влечет за собой увеличение потребления электрической энергии, формируя новые центры энергопотребления.

Рассматривая вышеупомянутые районы, стоит отметить, что в их состав входят территории с распределенной генерацией и потреблением электрической энергии, работающие децентрализованно. Такие особенности структур и эксплуатации электрических сетей определяются нефтегазовыми минерально-сырьевыми разрабатываемыми месторождениями и жизнедеятельностью коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации.

Генерация электроэнергии на таких удаленных территориях от Единой национальной (общероссийской) энергетической сети производится с использованием возобновляемых источников энергии, а также с сопутствующим углеводородным топливом: солнечная, солнечная гибридная генерация, малые ГЭС, использование дизельных и газотурбинных генераторов. Таким образом, можно определить отдельную самодостаточную электросетевую структуру микрогрид, имеющую нагрузку общим

значением менее 100 кВт·А [2, 3]. Однако у подобного рода сетей крайне низкая надежность, что влечет за собой сбои в электроснабжении потребителей [4, 5].

Одним из способов повышения надежности подобных сетей является объединение микрогрид в единую малую сеть с различной степенью автоматизации, называемую минигрид [6–8]. Таким образом, повышается структурная надежность электрической сети, а в связи с несовпадением суточных графиков нагрузки появляется оперативный резерв мощности, затрачиваемый на частичное электроснабжение потребителей при отключении локально установленного «генератора». Приобретенный таким образом запас электрической мощности в дальнейшем можно использовать на развитие инфраструктуры населенных пунктов.

В пользу такого подхода стоит отметить политику некоторых регионов, например, Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, где предусматриваются субвенции на возмещение недополученных доходов организациям, осуществляющим реализацию электрической энергии населению и приравненным к ним категориям потребителей в зоне децентрализованного электроснабжения по социально ориентированным тарифам [9].

Построение подобных сетей (минигрид) связано с минимизацией затрачиваемых ресурсов на электрическое соединение всех пунктов потребления электрической энергии воедино, а также с поддержанием режимных параметров в допустимых ин-

тервалах. Данные требования необходимо достичь на этапе проектирования структуры сети: выбор трасс линий электропередачи (ЛЭП), определение последовательности электрических соединений, а также (при необходимости) определение «соединительного узла».

Однако перебор возможных сочетаний требует больших затрат по времени и вычислительных ресурсов, а следовательно, требует автоматизированного расчета со специализированными методами определения оптимальной структуры сети.

Автоматизированные расчеты для решения подобных задач широко используются в электронике и в организации компьютерных сетей — взаимодействие ИТ-инфраструктуры, но для проектирования электрических сетей, а также для инженерных коммуникаций в целом находятся на этапе развития [10, 11].

Так, например, в работе [12] представлен подход к определению местоположения подстанции по ценовой поверхности прокладываемого кабеля для обеспечения электрической энергией многоквартирных домов. Такой подход к определению оптимальной точки размещения достаточно прост и даёт хорошие результаты, однако полученная трасса кабельной линии не является оптимальной с точки зрения прокладки, т.к. наличие многих поворотов на трассе не только усложняет возведение трассы, но и сказывается на целостности кабеля (нарушается однородность изолирующих материалов в местах перегиба).

Аналогичный подход реализован авторами в работе [13]. В качестве анализируемого объекта принята матрица геодезических дистанций, содержащая информацию о капитальных затратах для соединений двух точек местности.

Подобные методы определения трасс линий электропередачи основаны на графовых структурах (способ представления исследуемой территории) и алгоритмах поиска по графу. Накладывая дополнительные ограничения на граф или же изменяя, модернизируя эвристическую функцию алгоритма поиска пути, можно решать различные задачи, в том числе и для нужд электроэнергетики [14, 15]. В работе [16] авторы определяют оптимальную трассу линии электропередачи с использованием растровых и векторных данных. Задача решается с помощью оценки проходимости территории с учётом технических ограничений линий электропередачи [17] и охранных зон объектов электросетевого хозяйства [18]. Данный подход позволяет учитывать особенности существующей сетевой инфраструктуры, позволяя формализовать предпочтение по сближению линии электропередачи с иными техническими коммуникациями. Полученный авторами результат исследования (трасса линии электропередачи) показал своё экономическое преимущество по отношению с официально принятым проектным решением, однако используемый метод экспертных оценок и субъективность весовых коэффициентов, используемых при оценке критериев трассы, даёт субъективно хороший результат, но не оптимальный.

Вышеупомянутые работы в качестве исходных данных принимают, в том числе, карту местности. В качестве такой карты может служить растровое изображение или данные из геоинформационных систем, которые в настоящее время быстро развиваются. С развитием нейросетевого программирования, в частности сверточных нейронных сетей,

а также нейронных сетей классификаторов, стало возможным определение ландшафтных особенностей рассматриваемых областей по спутниковым снимкам и др. Также геоинформационная система может иметь информацию о строении почв, охранных зонах и другую информацию, необходимую при проектировании объектов электроэнергетики. Перевод данных подобных систем в графовые структуры является тривиальной задачей.

Резюмируя вышесказанное, стоит отметить, что развитие децентрализованных районов придаст импульс развитию топливно-энергетического комплекса, однако из-за специфики территориального расположения необходимы методы определения структуры электрической сети для достижения дешевизны проектируемой сети, бесперебойного электроснабжения с надлежащим качеством электрической энергии, а также достижения требований рационального природопользования и др.

Постановка задачи. В связи с ростом ответственной по электроснабжению инфраструктуры в удаленных от Единой национальной (общероссийской) электрической сети населенных пунктов и разрабатываемых месторождений нефтегазодобычи необходимо частичное объединение распределенной генерации и потребления в минигрид с различным уровнем автоматизации, что повысит структурную надежность, а также предоставит оперативный резерв мощности. Таким образом, объектом исследования в данной работе являются электрические сети децентрализованных районов. Предметом исследования выступает структура минигрида, объединяющая рассредоточенные точки генерации и потребления (микрогрид).

Для того чтобы определить оптимальную структуру будущей электрической сети, необходимо определить оптимальный для данной задачи алгоритм поиска пути по графу, определить наилучшие (равнозначные) варианты трасс электрических связей между всеми объектами электроэнергетики, определить точки размыкания сложноразветвленной сети, провести анализ полученной сети.

Теория. В задачах размещения в качестве графа выступает поделенная на секторы местность, где планируется проектирование электроустановки. Секторы выступают в качестве узлов графа. Связи же графов определяются из условий задачи. Если по условиям задачи необходимо найти кратчайший путь из одной вершины в другую, то веса ребер в таком случае бинарные. В случае нахождения, например, самого экономичного пути (не всегда самого короткого) величины весов ребер принимаются из соображений капиталовложений для соединения двух смежных вершин линией электропередачи (в именованных или относительных единицах). Таким образом, функция минимизации для решения задачи соединения линией электропередачи двух разных объектов энергетики сводится к нахождению пути (1), сумма весов ребер которого будет минимальной (2).

$$K_s(p) = \sum_{i=1}^m K(v_{i-1}, v_i), \quad (1)$$

$$K_{s \min}(v_s, v_e) = \begin{cases} \min \{ K_s(p) : v_s \rightarrow^p v_e \}, \\ \text{если сущ. — ет путь из } v_s \text{ в } v_e, \\ \infty, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

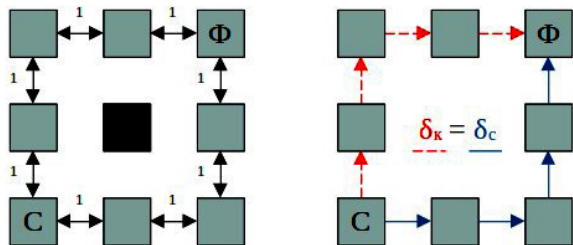


Рис. 1. Пример равнозначных путей на графе

где K_A — объём капиталовложений на строительство ЛЭП; K — величина капиталовложений на электрическое соединение между двумя смежными вершинами графа v_{i-1} и v_i ; m — количество вершин, входящих в последовательность p , представляющую собой трассу ЛЭП; $K_{\min}$ — минимальный объём капиталовложения на строительство ЛЭП, связывающей вершины графа v_s , v_b , соответствующие началу и концу трассы.

Для поиска минимальной по величине капиталовложений трассы используются оригинальные алгоритмы поиска по графу Дейкстры и A^* или наследованные от них семейства алгоритмов [19].

В случае алгоритма Дейкстры исследование, а следовательно, и поиск пути происходит в радиальном направлении (в форме многолучевой звезды), т.к. алгоритм Дейкстры, в свою очередь, наследник такого поискового алгоритма как «Поиск в ширину». Распределяясь во всех направлениях (главное условие — дешевизна следующего шага) алгоритм Дейкстры затрачивает больше времени для исследования, чем A^* , но он исследует большее количество узлов графа.

Алгоритм A^* , в свою очередь, ориентируется помимо стоимости следующего шага и на направление, в котором необходимо исследовать область для достижения цели. A^* позволяет в кратчайшие сроки и с меньшими вычислительными мощностями достигнуть результата.

Хотя алгоритм A^* позволяет быстрее добраться до цели, однако исследование секторов, лежащих в противоположном от цели направлении, не проводится, что приводит к возможности неверного нахождения пути. Также поиск A^* для нескольких целей производится последовательно, т.е. алгоритм находит путь к одному узлу, затем к следующему и т.д. Алгоритм Дейкстры в процессе своей работы находит путь до каждого посещенного узла, что позволяет искать маршруты для нескольких точек сразу. Также условно радиальное распространение алгоритма позволяет исследовать и секторы в противоположном от цели направлении, чего лишен алгоритм A^* .

Таким образом, при построении нескольких трасс линий электропередачи от источника питания к узлам нагрузки предпочтительнее использовать именно алгоритм Дейкстры, позволяющий также реагировать на уже имеющиеся электрические сети в исследуемом регионе.

В ходе решения инженерных задач появляются случаи, когда возможно появление равнозначных решений. Классическими подходами выбора единственного решения являются зашумление данных поискового пространства или отбор и сохранение только первого или последнего найденного решения.

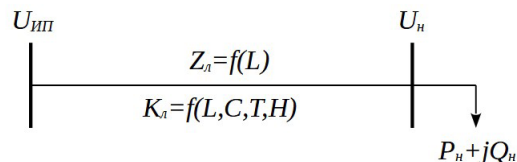


Рис. 2. Пример электрической сети с одной линией электропередачи

Однако выбор трассы технических коммуникаций может зависеть не только от конфигураций ценовой поверхности, но и из соображений удобства прокладки, дальнейшего расширения коммуникаций и т.д. В таком случае необходим поиск и сохранения множества равнозначных решений (рис. 1).

Так, на рис. 1 представлен неориентированный граф, связи вершин которого представлены в виде стрелок. Начальный и конечный узлы соответствуют буквам «С» и «Ф». Как видно по рисунку, количество путей, связывающих два узла, равно 2 (путь «К» и путь «С»), стоимости данных путей также равны $\delta_k = \delta_c$.

Для поиска всех возможных решений классический алгоритм Дейкстры не подходит. Необходимо его модернизировать, внося коррективы в запоминание не единственного наилучшего пути, а, если попадают несколько совпадающих по стоимости путей, сохранять их все. Естественно, многие из этих вариантов трасс нежизнеспособны и на практике маловероятно будут использоваться. Для того, чтобы отсеять такие варианты, необходимо дополнить алгоритм Дейкстры постобработкой результатов по каким-либо критериям, использовать эвристическую функцию.

Рассмотрим линию электропередачи, соединяющую источник питания (ИП) и пункт потребления электроэнергии, которым соответствуют напряжения $U_{ип}$ и U_n (рис. 2).

В точке балансовой принадлежности, на шине с напряжением U_n , допустимо отклонение напряжения до $\pm 10\%$ [20]. В свою очередь, потери напряжения до узла нагрузки можно определить как

$$\Delta U_{\%} = \frac{P_n R_{\lambda} + Q_n X_{\lambda}}{U_{ном}^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где R_{λ} , X_{λ} — активное и реактивное сопротивления линии соответственно, Ом; $U_{ном}$ — номинальное напряжение сети, В; P_n , Q_n — активная и реактивная мощности нагрузки соответственно, Вт, вар.

В свою очередь, R_{λ} и X_{λ} находятся через погонные параметры ЛЭП и зависят от протяженности линии как

$$Z_{\lambda} = R_{\lambda} + jX_{\lambda} = L(r_0 + jx_0), \quad (4)$$

где Z_{λ} — полное сопротивление ЛЭП, Ом; L — длина ЛЭП, км; r_0 , x_0 — активное и реактивное погонные сопротивления ЛЭП, Ом/км.

Таким образом, для выполнения условий по отклонению напряжения ($\pm 10\%$) необходимо производить поиск трассы линии электропередачи с наименьшей длиной. С другой стороны, при учете резко неоднородного ландшафта линии с наименьшей протяженностью могут многократно превышать стоимость линий, огибающих препятствия. Перепад высот, повороты трассы требуют установ-

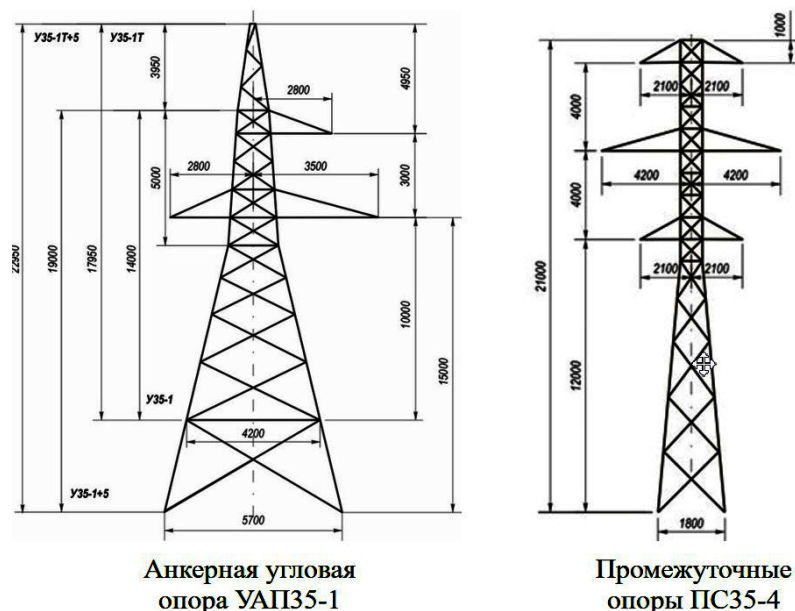


Рис. 3. Анкерная угловая опора и промежуточная (35 кВ)

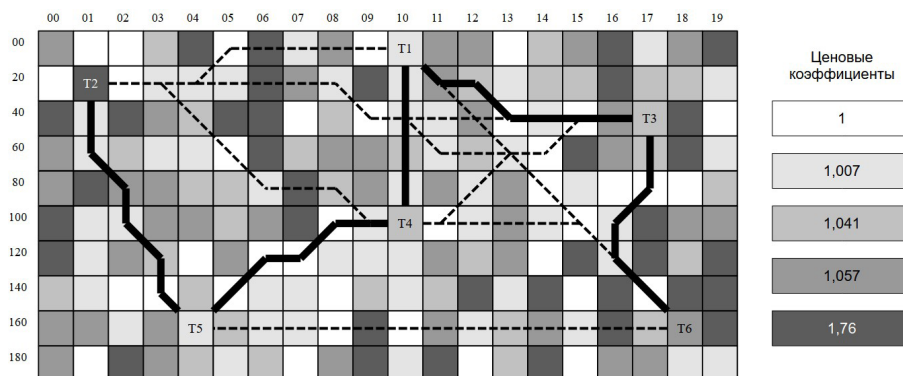


Рис. 4. Рассматриваемая область с резко неоднородным ландшафтом и смоделированной электрической сетью

ку дополнительных анкерных опор, стоимость которых на 30 % больше промежуточных (рис. 3), что увеличивает общую стоимость ЛЭП.

Таким образом, капиталовложения для строительства ЛЭП можно описать как некоторую функцию $K_A = f(L, C, T, H)$, зависящую от протяженности линии L , удельных капиталовложений в зависимости от вида ландшафта C , от количества поворотов T , а также перепада высот H .

Предлагается обрабатывать результаты модернизированного алгоритма Дейкстры с помощью фильтров в последовательности: поиск наикротчайших, поиск с наименьшим количеством поворотов, поиск трасс с наименьшим перепадом высот по длине.

Результаты эксперимента. Рассмотрим случайно сгенерированную прямоугольную область, представляющую собой разнородный ландшафт, поделенный на прямоугольные секторы размером 1×1 км. Таким образом, получается координатная сетка, содержащая по горизонтали $n = 10$ рядов и по вертикали $m = 10$ рядов. Общее количество секторов равно $n \cdot m = 10 \cdot 10 = 100$ (рис. 4).

На рис. 4 область представлена в виде ценовой поверхности, сформированной на основании стоимости электрического соединения смежных узлов

(клеток) на основании укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства [21]. Допущением при формировании ценовой поверхности является использование максимальных затрат на строительство ЛЭП, т. е. двухцепной линии на отдельных опорах с максимальным сечением провода. По итогу определения структуры необходим пересчет капиталовложений с учетом количества цепей линии, их прокладки и фактического сечения провода.

Величины ценовых коэффициентов приняты для пяти случаев трассы двух цепей на отдельно стоящих опорах с сечением провода 150 мм^2 : равнина (1 о. е., или 9080 тыс. руб./км); просека через кустарник и мелколесье (1,007 о. е., или 9140 тыс. руб./км); просека (1,041 о. е., или 9454 тыс. руб./км); просека с выкорчевыванием пней (1,057 о. е., или 9602 тыс. руб./км); болотистая местность (1,759 о. е., или 15970 тыс. руб./км). Задача на данном этапе сводится к нахождению трасс, связывающих всевозможные сочетания пар вершин, которым соответствуют пункты генерации (T1) и потребления (T2–T6).

Результаты моделирования

Стартовый узел	Конечный узел	Трасса, узлы	Стоимость пути, о. е.	Протяженность, км
10 (T1)	21 (T2)	21-24-5-10	10,63	9,41
	57 (T3)	57-53-32-31-10	8,04	7,83
	110 (T4)	110-10	5,08	5,00
	164 (T5)	164-126-127-108-68-30-10	11,20	11,07
	178 (T6)	178-10	11,54	11,31
21 (T2)	57 (T3)	57-49-28-21	17,79	16,41
	110 (T4)	110-109-88-86-23-21	11,95	10,66
	164 (T5)	164-143-123-102-82-61-21	8,77	8,24
	178 (T6)	178-73-71-50-49-28-21	21,24	19,90
57 (T3)	110 (T4)	110-111-73-74-55-57	8,36	8,24
	164 (T5)	164-126-130-73-74-55-57	15,62	15,49
	178 (T6)	178-136-116-97-57	7,36	7,24
110 (T4)	164 (T5)	164-126-127-108-110	7,27	7,24
	178 (T6)	178-115-110	9,38	9,24
164 (T5)	178 (T6)	178-164	15,81	14
ИТОГО ДЛЯ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ			36,52	35,55

*прямолнейные участки трасс представлены в виде узел начала — узел конца прямолнейного участка, т. е. для участка 1-2-3-4 запись будет иметь вид: 1-4.

**полужирным выделены трассы, входящие в результирующую схему электрических соединений

В результате работы алгоритма Дейкстры, модернизированного с учетом всех равнозначных путей с последующей фильтрацией с помощью эвристической функции, были получены всевозможные сочетания соединений, представленные в виде жирных и пунктирных линий на рис. 4, табл. 1.

Представленная на рис. 4 схема является сложной замкнутой и не подходит для дальнейшего использования в качестве варианта сети. Необходимо определить точки размыкания данной сети с учетом наименьшей протяженности линий электропередачи. В качестве критерия поиска принята суммарная протяженность линий электропередачи (5), связанная с потерями напряжения (3) для магистральной сети. Т. е. при возможном построении магистральной линии электропередачи предпочтение будет отдаваться участкам трасс с наименьшей протяженностью.

$$L_{\Sigma}(G') = \sum_{(u,v) \in G'} L(u,v), \quad (5)$$

где L_{Σ} — общая протяженность ЛЭП некоторой достаточной схемы электрических соединений G' ; $L(u,v)$ — протяженность ЛЭП, соединяющей пару пунктов u и v .

Таким образом, целевой функцией будет $\min[L_{\Sigma}(G')]$, зависящей от схемы электрических соединений.

Для подобного рода задачи предлагается использовать алгоритм Прима, предназначенный для определения минимального оставшегося дерева неориентированного графа [19]. Также стоит учесть, что работа алгоритма Прима будет производиться на графе, полученном в результате использования алгоритма Дейкстры, т.е. на трассах линий с наименьшими капиталовложениями.

Полученная схема электрической сети представлена на рис. 4 (жирные линии).

Заключение. В данной работе был рассмотрен подход к построению структур минигрид децентрализованных районов с использованием графовых структур и алгоритмов поиска по графу (с учётом допущения на формирование стоимостной поверхности): алгоритм Дейкстры, алгоритм Прима.

Неотъемлемой частью данного подхода к проектированию электрических сетей является учет всевозможных равнозначных трасс линий электропередачи. Также используется модернизированный алгоритм поиска по графу, учитывающий технические ограничения, являющиеся специфичными для различных типов коммуникаций.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РНФ «Разработка принципов управления и контроля режимов работы электроэнергетических систем на основе вейвлет преобразования данных о параметрах режима» Соглашение № 22-29-20052.

Библиографический список

1. Российская Федерация. Постановление. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»: постановление от 15 апреля 2014 г. № 321. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
2. ГОСТ Р 55993-2014/IEC/TS 61836:2007. Системы фотоэлектрические. Термины, определения и символы. Введ. 2015–01–01. Москва: Стандартинформ, 2007. 85 с.
3. Молодк В. В., Исамухамедов Я. Ш., Барин В. А. О разработке целевой модели (прототипа) Mini/Microgrid // Энергетик. 2021. № 9. С. 48–53. EDN: GGAKFC.
4. Фишов А. Г. Технические и экономические аспекты создания минигридов и их интеграции с централизованным энергоснабжением // Энергетик. 2022. № 4. С. 27–34. EDN: CZLOIZ.

5. Бык Ф. А., Мышкина Л. С. Надежность объектов распределенной энергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14, № 1. С. 45–51. DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-1-45-51. EDN: XRWJGO.
6. Bintoudi A., Demoulias C. Optimal isolated microgrid topology design for resilient applications // Applied Energy. 2023. Vol. 338 (1). P. 120909. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120909.
7. Du S., Wu D., Dai Z. [et al.]. Regional collaborative planning equipped with shared energy storage under multi-time scale rolling optimisation method // Energy. 2023. Vol. 277 (5). P. 127680. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127680.
8. Zhou Y., Ma Y., Wang J. [et al.]. Collaborative planning of spatial layouts of distributed energy stations and networks: A case study // Energy. 2021. Vol. 234 (3). P. 121205. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121205.
9. О мерах по реализации государственной программы Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Жилищно-коммунальный комплекс и городская среда»: постановление от 30 декабря 2021 г., № 635–п // Правительство Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. 2021. 30 декабря. 183 с.
10. Бушин С. А., Курейник В. В. Генетический алгоритм размещения разногабаритных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 12 (101). С. 22–27. EDN: LAUDKZ.
11. Ghorayeb K., Hayek H., Harb A. [et al.]. Bridging the integration gap — simultaneous optimization of well placement, well trajectory, and facility layout // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2023. Vol. 220. P. 111222. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111222.
12. Гадалов А. Б., Козлов Е. Г., Косяков С. В. Анализ стоимости размещения трансформаторных подстанций с использованием методов построения ценовых поверхностей в среде ГИС // Состояние и перспективы развития электро- и тепло-технологии (XXI Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 140-летию изобретения электросварки Н. Н. Бенардосом, 02–04 июня 2021 г. Иваново, 2021. Т. 3. С. 9–12. EDN: FWUTYG.
13. Афанасьев А. П., Гринкрот М. С., Ткачева Ю. И. Определение местоположения трансформаторных подстанций в сети электроснабжения низкого напряжения с помощью кумулятивной матрицы геодезических дистанций // Электро-техника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1, № 2. С. 17–20. EDN: SYETKT.
14. Хомченко В. Г., Зуга И. М., Кужель А. Н. [и др.]. Исследование качественных показателей методов трассировки на основе волнового алгоритма и алгоритма A* применительно к промышленным предприятиям // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 220–224. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-220-224. EDN: YSWONF.
15. Жила В. А., Ключко А. К., Маркевич Ю. Г. Нахождение конфигурации газораспределительных сетей математическими методами // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2013. № 1 (25). С. 1–4. EDN: RBBGHH.
16. Новаковский Б. А., Каргашин П. Е., Карпачевский А. М. Геоинформационный анализ территории для автоматизированного выбора трассы ЛЭП // Геоинформатика. 2017. № 2. С. 30–38. EDN: ZRCUOV.
17. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., изм. и доп. Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-та, 2005. 510 с.
18. Российская Федерация. Постановление. О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон: постановление от 24 февраля 2009 г. № 160. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
19. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч., Ривести Р. [и др.]. Алгоритмы: построение и анализ / пер. с англ. и ред. И. В. Красикова. 3-е изд. Москва: Вильямс, 2013. 1328 с. ISBN 978-5-8459-1794-2.
20. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
21. Российская Федерация. Приказ. Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства: приказ от 17 января 2019 г. № 10. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
-
- ТКАЧЕНКО Всеволод Андреевич**, преподаватель Политехнической школы Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.
SPIN-код: 5200-0062
AuthorID (РИНЦ): 939477
ORCID: 0000-0002-7321-1162
AuthorID (SCOPUS): 57210291005
ResearcherID: W-3652-2019
Адрес для переписки: sevaatmail@gmail.com
-
- Для цитирования**
- Ткаченко В. А. Разработка метода определения структуры мини-сети с учетом оптимальных маршрутов линий электропередачи на территории с резко неоднородным ландшафтом // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 109–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-109-116.
- Статья поступила в редакцию 05.06.2023 г.**
© В. А. Ткаченко

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE STRUCTURE OF MINI-GRID, TAKING INTO ACCOUNT OPTIMAL ROUTES OF POWER LINES IN AN AREA WITH SHARPLY HETEROGENEOUS LANDSCAPE

This paper presents a method for determining the optimal structure of an isolated electrical network, taking into account the geographical features of the area in which it is located. A distinctive feature of the method is the removal of restrictions on the number of equivalent routes of power transmission lines sought, with subsequent filtering of the routes, taking into account technological and technical limitations. Thus, the obtained method can be used to organize microgrids in areas remote from the Unified National (All-Russian) Energy Grid with distributed generation and load.

Keywords: decentralized power supply, minigrid, microgrid, optimal network structure, transmission line routing.

Acknowledgments

The work is carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant «Development of principles for controlling and controlling the operating modes of electric power systems based on wavelet transformation of data on mode parameters» Agreement No. 22-29-20052.

References

1. Rossiyskaya Federatsiya. Postanovleniye. Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye energetiki»: postanovleniye ot 15 aprelya 2014 g. No. 321 [Russian Federation. Resolution. On approval of the state program of the Russian Federation «Energy Development»: Decree dated April 15, 2014 No. 321]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
2. GOST R 55993-2014/IEC/TS 61836:2007. Sistemy fotoelektricheskoye. Terminy, opredeleniya i simvolyy [Solar photovoltaic energy systems. Terms, definitions and symbols]. Moscow, 2007. 85 p. (In Russ.).
3. Molodyuk V. V., Isamukhamedov Ya. Sh., Barinov V. A. O razrabotke tselevoy modeli (prototipa) Mini/Microgrid [About development of purposeful model (antetype) Mini / Microgrid] // *Energetik. Energetik*. 2021. No. 9. P. 48–53. EDN: GGAKFC. (In Russ.).
4. Fishov A. G. Tekhnicheskiye i ekonomicheskiye aspekty sozdaniya minigridov i ikh integratsii s tsentralizovannym energosnabzheniyem [Technical and economic aspects of creating minigrids and their integration with centralized power supply] // *Energetik. Energetik*. 2022. No. 4. P. 27–34. EDN: CZLOIZ. (In Russ.).
5. Byk F. L., Myshkina L. S. Nadezhnost' ob'yektov raspredelennoy energetiki [Reliability of distributed energy facilities] // *Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki. Safety and Reliability of Power Industry*. 2021. Vol. 14, no. 1. P. 45–51. DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-1-45-51. EDN: XRWJGO. (In Russ.).
6. Bintoudi A., Demoulias C. Optimal isolated microgrid topology design for resilient applications // *Applied Energy*. 2023. Vol. 338 (1). P. 120909. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120909. (In Engl.).
7. Du S., Wu D., Dai Z. [et al.]. Regional collaborative planning equipped with shared energy storage under multi-time scale rolling optimisation method // *Energy*. 2023. Vol. 277 (5). P. 127680. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127680. (In Engl.).
8. Zhou Y., Ma Y., Wang J. [et al.]. Collaborative planning of spatial layouts of distributed energy stations and networks: A case study // *Energy*. 2021. Vol. 234 (3). P. 121205. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121205. (In Engl.).
9. O merakh po realizatsii gosudarstvennoy programmy Khanty — Mansiyskogo avtonomnogo okruga — Yugry «Zhilishchno-kommunal'nyy kompleks i gorodskaya sreda»: postanovleniye ot 30 dekabrya 2021 goda No. 635-p [On measures to implement the state program of the Khanty-Mansiysk Autonomous Region — Ugra «Housing and communal services complex and urban environment»: Resolution of December 30, 2021, No. 635-p] // *Pravitel'stvo Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga — Yugry. Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Region*. 2021. 183 p. (In Russ.).
10. Bushin S. A., Kureynik V. V. Geneticheskiy algoritm razmeshcheniya raznogabaritnykh elementov [Different-dimension elements placement genetic algorithm] // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences*. 2009. No. 12 (101). P. 22–27. EDN: LAUDKZ. (In Russ.).
11. Ghorayeb K., Hayek H., Harb A. [et al.]. Bridging the integration gap — simultaneous optimization of well placement, well trajectory, and facility layout // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2023. Vol. 220. P. 111222. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111222. (In Engl.).

12. Gadalov A. B., Kozlov E. G., Kosyakov S. V. Analiz stoimosti razmeshcheniya transformatornykh podstantsiy s ispol'zovaniyem metodov postroyeniya tsenovykh poverkhnostey v srede GIS [Power distribution substations locations analysis using the methods of constructing cost surfaces in GIS] // *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XXI Benardosovskiye chteniya). State and Prospects for the Development of Electrical and Thermal Technology (XXI Benardos Readings)*. Ivanovo, 2021. Vol. 3. P. 9–12. EDN: FWUTYG. (In Russ.).
13. Afanas'yev A. P., Grinkrug M. S., Tkacheva Yu. I. Opredeleniye mestopolozheniya transformatornykh podstantsiy v seti elektrosnabzheniya nizkogo napryazheniya s pomoshch'yu kumulyativnoy matritsy geodezicheskikh distantsiy [Finding coordinates of transformer substations in low voltage power supply network with the help of the cumulative matrix of geodesic distances] // *Elektrotehnika: Setevoy Elektronnyy Nauchnyy Zhurnal. Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 1, no. 2. P. 17–20. EDN: SYETKT. (In Russ.).
14. Khomchenko V. G., Zuga I. M., Kuzhel' A. N. Issledovaniye kachestvennykh pokazateley metodov trassirovki na osnove volnovogo algoritma i algoritma A* primenitel'no k promyshlennym predpriyatiyam [Qualitative research of routing methods based on wave algorithm and algorithm A* for industrial plants] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 6 (162). P. 220–224. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-220-224. EDN: YSWONF. (In Russ.).
15. Zhila V. A., Klochko A. K., Markevich Yu. G. Nakhozheniye konfiguratsii gazoraspredelitel'nykh setey matematicheskimi metodami [Finding the configuration of gas distribution networks by mathematical methods] // *Internet-Vestnik VolgGASU. Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2013. No. 1 (25). P. 1–4. EDN: RBBGHH. (In Russ.).
16. Novakovskiy B. A., Kargashin P. E., Karpachevskiy A. M. Geoinformatsionnyy analiz territorii dlya avtomatizirovannogo vybora trassy LEP [Gis-techniques application for automatic power line route selection] // *Geoinformatika. Geoinformatika*. 2017. No. 2. P. 30–38. EDN: ZRCUOB. (In Russ.).
17. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]. Novosibirsk, 2005. 510 p. (In Russ.).
18. Rossiyskaya Federatsiya. Postanovleniye. O poryadke ustanovleniya okhrannykh zon ob'yektov elektrosetevogo khozyaystva i osobykh usloviy ispol'zovaniya zemel'nykh uchastkov, raspolozhennykh v granitsakh takikh zon: postanovleniye ot 24 fevralya 2009 g. No. 160 [Russian Federation. Resolution. On the procedure for establishing security zones of electric grid facilities and special conditions for the use of land plots located within the boundaries of such zones: Resolution of February 24, 2009 No. 160]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
19. Kormen T. Kh., Leizeron C., Rivest R. [et al.]. Algoritmy: postroyeniye i analiz [Algorithms: construction and analysis]. Moscow, 2013. 1328 p. ISBN 978-5-8459-1794-2. (In Russ.).
20. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 19 p. (In Russ.).
21. Rossiyskaya Federatsiya. Prikaz. Ob utverzhdenii ukрупnennykh normativov tseny tipovykh tekhnologicheskikh resheniy kapital'nogo stroitel'stva ob'yektov elektroenergetiki v chasti ob'yektov elektrosetevogo khozyaystva: prikaz ot 17 yanvarya 2019 g. No. 10 [Russian Federation. Order. On approval of consolidated price standards for standard technological solutions for capital construction of electric power facilities in terms of power grid facilities: order dated January 17, 2019 No. 10]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).

TKACHENKO Vsevolod Andreevich, Lecturer at the Polytechnic School, Yurga State University, Khanty-Mansiysk.
 SPIN-code: 5200-0062
 AuthorID (RSCI): 939477
 ORCID: 0000-0002-7321-1162
 AuthorID (SCOPUS): 57210291005
 ResearcherID: W-3652-2019
 Correspondence address: sevaatmail@gmail.com

For citations

Tkachenko V. A. Development of a method for determining the structure of mini-grid, taking into account optimal routes of power lines in an area with sharply heterogeneous landscape // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 109–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-109-116.

Received June 05, 2023.
 © V. A. Tkachenko

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК [621.039.5:621.646]:658.58
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124
EDN: VNPXYM

**Е. А. АБИДОВА
В. И. РАТУШНЫЙ**

Волгодонский инженерно-
технический институт-
филиал Национального
исследовательского ядерного
университета «МИФИ»,
г. Волгодонск

РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ КОНТРОЛЯ ПРОТЕЧЕК ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Статья посвящена проблеме идентификации негерметичности трубопроводной арматуры. Описывается измерительный комплекс контроля протечек. В отличие от принятого в практике органолептического подхода предлагается автоматическая обработка сигнала с последующим выводом о герметичности арматуры. В основу автоматической обработки положен алгоритм на основе анализа сингулярного спектра, обеспечивающего повышение чувствительности. Эффективность комплекса подтверждается результатами испытаний измерительного комплекса с использованием гидравлического стенда.

Ключевые слова: протечка арматуры, акустический сигнал, диапазон рабочих частот, анализ сингулярного спектра, проверка статистических гипотез, ошибки первого и второго рода.

Введение. Протечки арматуры представляют угрозу безопасности атомных станций. Одной из важнейших задач технической диагностики оборудования атомных электростанций (АЭС) является контроль протечек [1–3]. В настоящее время широкое распространение получили тепловизионный и ультразвуковой способ контроля внутренних и внешних протечек. Существуют также методы контроля герметичности с применением индикаторного газа, например, предлагаемые Pfeiffer Vacuum подразумевают создание давления в испытательном образце с помощью газовой смеси (содержащей гелий) и поэтому имеют существенные ограниче-

ния для применения на работающем оборудовании. Проблемой использования тепловизионного подхода [4] является недоступность приборов с достаточной температурной чувствительностью и сложность подстройки уровня и диапазона. Внедрение устройств и приборов, реализующих ультразвуковой подход, перспективно за счет доступности и универсальности метода [5, 6].

В практике контроля протечек оборудования АЭС положительно зарекомендовали себя приборы типа Ultraprobe (США), SDT (Бельгия), Uniscopre (Россия). Эксплуатируемые на АЭС течеискатели имеют ряд ограничений. Например, для настройки

Ultraprobe необходимо различить на слух наличие частотных составляющих в выбранной полосе частот [7]. Процесс настройки требует многократных измерений для поиска значимых частотных компонент. Встроенный в Ultraprobe спектральный анализатор выводит спектр подаваемого на наушники звукового сигнала и ограничен диапазоном до 5 кГц.

Кроме того, на рынке имеются ультразвуковые течеискатели LD 500/510, обеспечивающие обнаружение и расчет утечек, а также их фотофиксацию. Но подобные приборы существенно уступают вышеуказанным в чувствительности из-за слабой фильтрации посторонних шумов.

Постановка задачи. Имеющиеся подходы к поиску негерметичности и применяющиеся для этой цели приборы имеют ограничения, которые в ряде случаев приводят к неопределенности при локализации течи. Поэтому задачей исследования является обоснование аппаратной реализации регистрирующего прибора и объективных критериев диагностирования, обеспечивающих чувствительность при локализации течи.

Аппаратная реализация. В рамках договора между НИЯУ МИФИ и Концерном «Росэнергоатом» нами был разработан измерительный комплекс контроля протечек (ИККП) [8]. ИККП, как показано на рис. 1, представляет собой переносной программно-технический комплекс, включающий технические средства:

- базовый модуль;
- датчик акустический контактный;
- высокочастотный микрофон свободного поля;
- планшетный ПК;
- специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнить: регистрацию и хранение акустических сигналов; обработку и анализ полученных акустических сигналов; формирование выводов по итогам измерения в заданном формате.

Стоимость ИККП в два-три раза ниже зарубежных аналогов (Ultraprobe, SDT). Используемый в ИККП акустический датчик GT400 (рис. 2а) имеет температурный диапазон до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, а теплопередача происходит через острие щупа, что приводит к медленному нагреву преобразователя и большему времени работы при высоких температурах объекта контроля. С точки зрения ширины диапазона рабочих температур ИККП лучше приспособлен для работы в условиях АЭС, чем Uniscopre, включающий датчики GT200 и GT205 (рис. 2б).

Обзор известных методов обработки акустических сигналов при идентификации протечек

1) органолептическое восприятие оператором акустического шума, создаваемого турбулентным потоком жидкости или газа через несплошности. Подход в настоящее время всё ещё используется, но не всегда надежен из-за особенностей восприятия диагностом;

2) автоматическое сопоставление уровня акустического шума на герметичном оборудовании с зарегистрированным сигналом на том же оборудовании [3]. При реализации метода делается предположение о линейном характере зависимости между значением утечки и уровнем акустического сигнала. Линейный характер зависимости не всегда подтверждается экспериментально, что и приводит к ошибкам при локализации течи;

3) сопоставление спектров, основанное на эмпирически выявленной закономерности, заключающейся в том, что появление утечки приводит

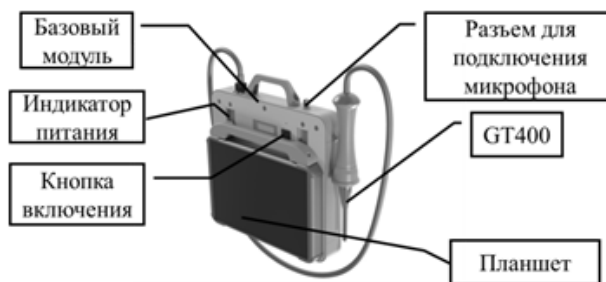


Рис. 1. Измерительный комплекс контроля протечек оборудования АЭС

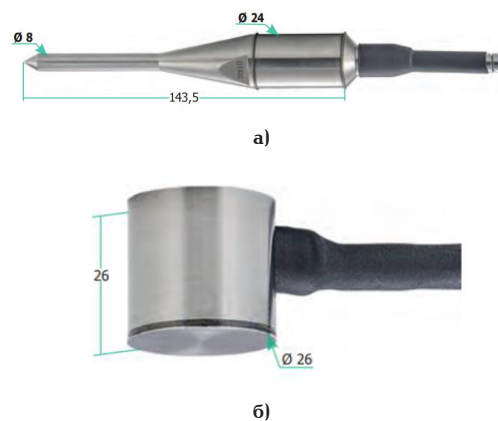


Рис. 2. Акустические датчики: а) GT400; б) GT205

к сужению Фурье-спектра сигнала и смещению в область низких частот [5]. Расширение базы экспериментов, показывает, что наблюдаемая закономерность является лишь частным случаем. Анализ акустических сигналов и соответствующих спектров герметичной и негерметичной арматуры демонстрирует, что потоки через несплошности приводят к практически непредсказуемым изменениям как амплитуды, так и частоты;

4) энтропийная параметризация акустических и звуковых сигналов [9], по результатам которой делается вывод о наличии и величине протечки. Метод имеет преимущества перед ранее описанными за счет инвариантности к нестационарным и хаотическим проявлениям. Широкое применение метода ограничено сложностью вычисления и необъективностью выбора параметров расчета (объем и частота выборки, длина окна);

5) метод сингулярного спектрального анализа (Singular spectrum analysis — SSA) предлагается в ряде работ для обработки диагностических сигналов [10, 11]. Преимуществом метода является возможность анализа нестационарных рядов. Метод позволяет оценить вклад линейных трендов, периодических и хаотических составляющих, т.е. выявить любые качественные и количественные изменения. В настоящей работе предлагается обеспечить чувствительность при выявлении протечек за счет применения SSA к сигналам, зарегистрированным ИККП.

Предлагаемый алгоритм обработки сигналов. При контроле герметичности измеряют сигналы после запорной арматуры (рис. 3). Сигнал, зарегистрированный после герметичной арматуры при тех же условиях, используется в качестве эталон-

ного. Установление отклонений в работе оборудования базируется на сопоставлении характеристик его сигналов в исправном и неисправном состоянии, причем сопоставление характеристик исходных сигналов не обеспечивает явных признаков различия. Известно, что низкочастотная модулирующая составляющая несет в себе максимум диагностической информации [12]. В практике обработки диагностических сигналов выделения модулирующей составляющей на несущей частоте хорошо зарекомендовал себя метод получения огибающей путем вычисления скользящего среднеквадратичного значения (СКЗ) [13, 14]. Метод СКЗ — простой способ, обеспечивающий демодуляцию и одновременно фильтрацию случайной составляющей. При вычислении число точек усреднения l выбирается в соответствии с отношением частоты дискретизации и несущей частоты (при измерении с использованием датчика GT400 несущая — около 60 кГц). При использовании метода СКЗ по исходному дискретному сигналу, включающему L значений, рассчитываются отчеты огибающей от x_1 до x_{L+1-l} как средние квадратические значения. Окно выходного сигнала построено в соответствии с уравнением 1, содержит значения:

$$x_k = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l x_i^2}.$$

В соответствии с известным алгоритмом SSA для обработки диагностических сигналов предложена последовательность преобразований временных рядов. Амплитуды огибающей диагностического сигнала представляют собой последовательность вида:

$$\{x_1, x_2, \dots, x_N\}.$$

Исходная последовательность значений преобразуется в ганкелеву матрицу:

$$[A] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_N \end{bmatrix}.$$

Матрица $[A]$ преобразуется в матрицу ковариации:

$$[C] = \begin{bmatrix} \text{Var}(x_1) & \text{Cov}(x_1 x_2) & \dots & \text{Cov}(x_1 x_n) \\ \text{Cov}(x_1 x_2) & \text{Var}(x_2) & \dots & \text{Cov}(x_2 x_{n+1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(x_{m-1} x_m) & \text{Cov}(x_m) & \dots & \text{Var}(x_N) \end{bmatrix}.$$

Ковариационная матрица подвергается сингулярному разложению:

$$[C]_{m \times n} = [U]_{m \times n} [S]_{m \times n} [V]^T_{n \times n},$$

где $[U]_{m \times n}$ и $[V]^T_{n \times n}$ — две унитарные матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов соответственно, $[S]_{m \times n}$ — матрица с неотрицательными элементами, у которой элементы, лежащие на главной диагонали, — это сингулярные числа (а все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми). Сингулярные числа составляют сингулярный спектр, отражающий в поряд-

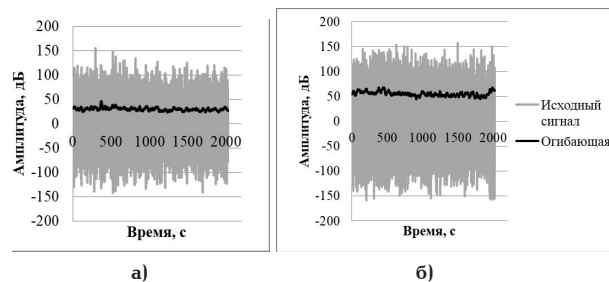


Рис. 3. Форма исходных акустических сигналов и их огибающие: а) зарегистрированный после герметичной арматуры (эталонный); б) зарегистрированный после герметичной арматуры

ке убывания вклад каждой из m компонент разложения. Спектр сигнала герметичной арматуры может быть достаточно точно описан минимумом своих составляющих. Спектр акустического сигнала, который формируется под действием шума от течи, в большинстве случаев является сложным, а его сингулярный спектр будет отличаться от спектра сигнала без течи [15].

В результате сингулярного разложения матрицы, соответствующей сигналу герметичной арматуры, получается эталонный базис. На данный базис производился проецирование матриц, соответствующих сигналам герметичной арматуры и анализируемой арматуры. Для того, чтобы проекции отражали качественные различия сигналов, производится умножение на траекторные матрицы. Таким образом, получают отмасштабированные проекции сравниваемых сигналов на эталонный базис:

$$[\bar{A}_1] = [V][A_1][S_1]$$

$$[\bar{A}_2] = [V][A_2][S_2],$$

V — эталонный базис;

$[\bar{A}_1], [\bar{A}_2]$ — траекторные матрицы эталонного и анализируемого сигналов;

$[S_1], [S_2]$ — собственные значения траекторных матриц эталонного и анализируемого сигналов.

Об эффективности применения алгоритма для выявления негерметичности можно судить по проекциям на первую компоненту $[\bar{A}_1^1], [\bar{A}_2^1]$. Статистическое сопоставление гипотез (в данном случае арматура «герметичная» и «негерметичная») проводится путем вычисления ошибок первого и второго рода по функциям плотности распределения вероятности [16]. Задачу анализа чувствительности, соответствующей методам диагностики оборудования АЭС, мы рассматриваем в контексте проблемы оценки риска. В данном контексте чувствительность устанавливается в качестве меры определенности результата диагностирования и может характеризоваться высокой вероятностью верного обнаружения и, соответственно, низкой вероятностью ошибок. В идеале, когда функции плотности распределения вероятности параметров герметичной и негерметичной арматуры совсем не пересекаются, ошибки равны нулю.

Проведение экспериментов. Описанный алгоритм был первоначально опробован при обработке сигналов, зарегистрированных в лабораторных условиях. Для получения акустических сигналов использовался стенд, представляющий собой гидравлическую петлю, заполненную технической

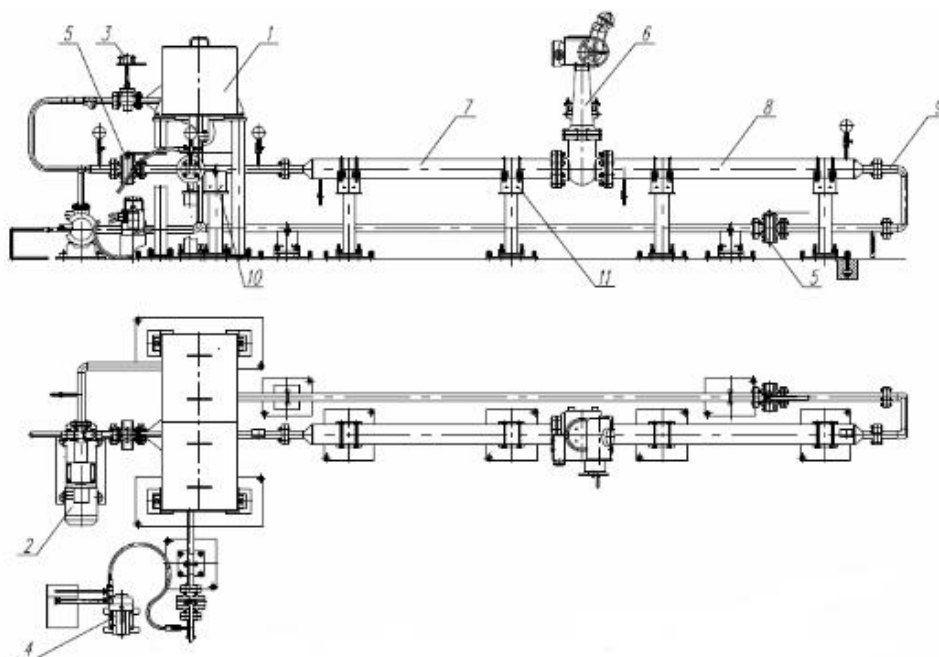


Рис. 4. Схема экспериментального стенда: 1 — блок; 2 — насос консольный; 3 — регулятор давления; 4 — опрессовочный насос; 5 — кран шаровой; 6 — арматура; 7, 8 — блок Ду50, Ду100, Ду150; 9 — отвод; 10 — опора неподвижная; 11 — опора подвижная

водой (рис. 4). Конструкция стенда позволяет повышать температуру до $+80^\circ\text{C}$ и давление среды до 2,5 МПа. Возможна установка запорных фланцевых клапанов типа 15с22нж различных диаметров Ду50, Ду100, Ду150. Объем течи в клапане моделируется при помощи проставок (рис. 5).

Табл. 1 (левая часть) описывает типы датчиков и условия проведения экспериментов. В рамках эксперимента задавалась температура $t=30^\circ$ и $t=80^\circ\text{C}$, поддерживалось давление 0,5 МПа, менялись проставки клапана Ду150. Сигнал регистрировался после арматуры с помощью акустических датчиков, которые различаются рабочими частотами: низкочастотный Gt205 (40–100 кГц), широкополосный Gt300 (100–800 кГц), полосовой Gt400 (50–250 кГц).

Для оценки ошибок диагностирования огибающие сигналов арматуры с проставками и без были представлены в виде функций плотности распределения вероятности. Примеры функций показаны на рис. 6.

При выборе граничного значения используется метод минимального числа ошибочных решений. Граница, относительно которой принимается решение о герметичности, из условия минимального значения суммы ошибок первого и второго рода определялась значением параметра, при котором обе гипотезы равновероятны (функции пересекаются).

Ошибка первого рода — признана негерметичной, но герметична — рассчитывалась путем суммирования вероятности параметров негерметичного состояния слева от границы. Ошибка второго рода — признана герметичной, но негерметична — рассчитывалась путем суммирования вероятности параметров негерметичного состояния справа от границы. Аналогично вероятности ошибок были оценены после применения к тем же сигналам алгоритма на основе SSA. Правая часть табл. 1 содержит результаты вычисления ошибок диагностирования в зависимости от условий эксперимента, типа датчика и метода обработки данных.

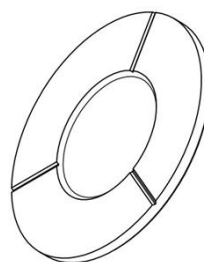


Рис. 5. Проставки: а) рисунок, б) фото

Обсуждение результатов. Результаты попарной обработки диагностических сигналов (табл. 1) показывают:

- сигналы, зарегистрированные датчиком Gt400 (серии экспериментов 4 и 5), демонстрируют чувствительность к состоянию оборудования и при этом, в отличие от датчика Gt205 (серии экспериментов 1 и 2), не реагируют на изменение температуры, поэтому выбор регистрирующего датчика в составе ИККП экспериментально обоснован;

- применение SSA к диагностическим сигналам позволяет снизить или исключить ошибки при определении состояния объекта, поэтому целесообразна программная реализация данного алгоритма в ИККП, поскольку значения ошибок после обработки снижаются независимо от условий эксперимента и вида датчика;

- отсутствует однозначная зависимость между объемом протечки (заданной числом рисков) и величиной ошибки, иначе говоря, отсутствует зависимость между объемом протечки и амплитудой и дисперсией сигнала, т.е. данные показатели сами по себе не могут использоваться для установления наличия и величины протечки.

Выводы. Разработан комплекс контроля протечек, предназначенный для контроля герметичности запорной арматуры в трубопроводах АЭС.

Результаты эксперимента

№	Условия эксперимента 1-го рода		Ошибка при анализе исходных данных, %		Ошибка при анализе данных после обработки, %	
			2-го рода	1-го рода	2-го рода	
1	Gt205, $t=30^{\circ}\text{C}$		1	0	0	0
	Герметичная	1 риска				
		2 риски				
		3 риски				
2	Gt205, $t=80^{\circ}\text{C}$		31	37	10	14
	Герметичная	1 риска				
		2 риски				
		3 риски				
3	Gt300, $t=80^{\circ}\text{C}$		20	35	0	4
	Герметичная	1 риска				
		2 риски				
		3 риски				
4	Gt400, $t=30^{\circ}\text{C}$		0	1	0	0
	Герметичная	1 риска				
		2 риски				
		3 риски				
5	Gt400, $t=80^{\circ}\text{C}$		5	10	0	0
	Герметичная	1 риска				
		2 риски				
		3 риски				

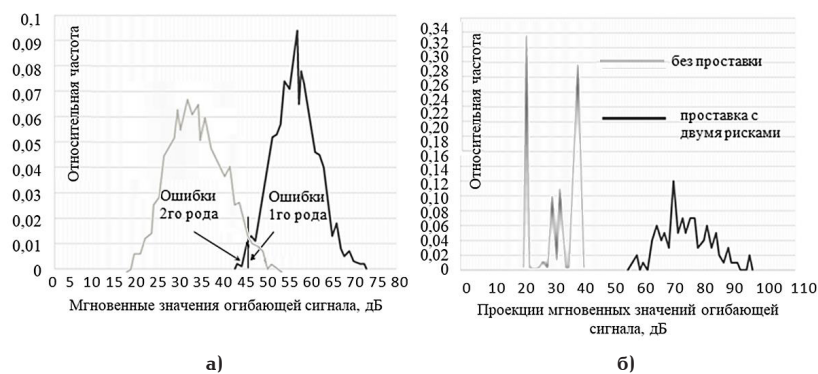


Рис. 6. Результаты обработки акустического сигнала после запорного клапана Ду150 герметичного и с проставкой, зарегистрированного преобразователем Gt400 при температуре 80°C : а) без обработки; б) после обработки

Особенностью измерительного комплекса является возможность регистрации акустического сигнала в широком частотном диапазоне, что обеспечивает чувствительность к наличию протечек. Достоинствами прибора также являются широкий диапазон рабочих температур, относительная простота, низкая стоимость комплектации. В основу обработки данных положен алгоритм на основе SSA. Приводятся результаты испытаний измерительного комплекса с использованием гидравлического стенда: изменяется температура среды и объём протечки, используются различные акустические преобразователи. Эксперименты подтверждают эффективность комплекса, реализующего автоматическую

обработку сигнала с последующим выводом о герметичности арматуры. Комплекс контроля протечек внедрен на Нововоронежской АЭС и используется персоналом по своему назначению.

Библиографический список

1. РД ЭО 1.1.2.01.0190-2010. Положение по оценке технического состояния и остаточного ресурса трубопроводной арматуры энергоблоков атомных станций (с изм. 1-4) / ОАО «Концерн Росэнергоатом». Москва, 2016. 23 с.
2. Сейнов С. В., Гошко А. И., Адаменков А. К. [и др.]. Техническое диагностирование арматуры АЭС. Москва: Машиностроение (Библиотека арматурщика АЭС), 2012. 452 с.

3. НП-089-15. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва, 2017. 72 с.
4. Teju V., Bhavana D. An efficient object detection using OFSA for thermal imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education. 2020. № 1 (22). P. 1–22. DOI: 10.1177/0020720920944434.
5. Дроботов А. В. Метод диагностирования электроприводной арматуры с контролем диагностических параметров и опыт его применения на Смоленской АЭС // Арматуростроение. 2008. № 1 (52). С. 52–60.
6. Адаменков А. К., Веселова И. Н., Рясный С. И. Метод оценки герметичности трубопроводной арматуры тепловых и атомных станций. Тяжелое машиностроение. 2008. № 6. С. 2–3.
7. Испытания стендов «Крона-517» и «АТЭ ТС-3000». URL: <http://npk-krona.ru/2015/03/isyptaniya-stendov-krona-517-i-ate-ts-3000> (дата обращения: 01.04.2020).
8. Abidova E. A., Dembitsky A. E., Lapkis A. A., Chernov A. V. Synthesis of Control Systems for Complex Technical Objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971, Issue 3. 032058. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/032058.
9. Чернов А. В., Абидова Е. А., Херай Л. С. Диагностика негерметичности в затворе электроприводной арматуры по энтропийным показателям звуковых и ультразвуковых сигналов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493> (дата обращения: 10.06.2023).
10. Hassani J., Kalantari H., Beneki C. Comparative Assessment of Hierarchical Clustering Methods for Grouping in Singular Spectrum Analysis // Applied Math. 2021. Vol. 1 (1). P. 18–36. DOI: 10.3390/appliedmath1010003.
11. Hassani H., Kalantari M. Automatic Grouping in Singular Spectrum Analysis // Forecasting. 2019. Vol. 1. P. 189–204. DOI: 10.3390/forecast1010013.
12. Оптимизация методов диагностики подшипников качения по высокочастотной вибрации // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. 2002. Вып. 15. URL: <https://masters.donntu.ru/2010/etf/prokopets/library/article5.htm> (дата обращения: 10.06.2023).
13. Kilundu B., Dehombreux P., Letot C. [et al.]. Early detection of bearing damage by means of decision trees // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. 2009. Vol. 3. P. 70–74.
14. Balaratnam N., Weidenauer J., Wagner F. [et al.]. Comparison of envelope demodulation methods in the analysis of rolling bearing damage // Journal of Vibration and Control. 2022. P. 1–12. DOI: 10.1177/10775463221129155.
15. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis for Time Series. 2nd ed. New York: Springer, 2020. 146 p.
16. Бабенко Р. Г., Никифоров В. Н., Пугачёва О. Ю. [и др.]. Оценка вероятности обнаружения дефектов при диагностике оборудования виброакустическим методом // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 4. (13). С. 74–78.
-
- АБИДОВА Елена Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Волгодонского инженерно-технического института — филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ), г. Волгодонск. ORCID: 0000-0003-0258-5543
Адрес для переписки: 1nii_energomash@mail.ru
- РАТУШНЫЙ Виктор Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физико-математических дисциплин ВИТИ НИЯУ МИФИ, г. Волгодонск. SPIN-код: 6826-4290
ORCID: 0000-0002-5701-6279
AuthorID (SCOPUS): 6603218775
Адрес для переписки: VIRatushnyj@mephi.ru

Для цитирования

Абидова Е. А., Ратушный В. И. Регистрация и обработка сигналов в измерительном комплексе контроля протечек трубопроводной арматуры атомной электростанции // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124.

Статья поступила в редакцию 19.07.2023 г.

© Е. А. Абидова, В. И. Ратушный

REGISTRATION AND SIGNAL PROCESSING IN MEASURING SYSTEM FOR MONITORING LEAKS OF NPP PIPELINE FITTINGS

The article is devoted to the problem of identification of leakiness of pipeline fittings. A measuring system for leak monitoring is described. In contrast to the organoleptic approach adopted in practice, automatic signal processing is proposed, followed by a conclusion about the tightness of the valve. The automatic processing is based on an algorithm based on the analysis of the singular spectrum, which provides an increase in sensitivity. The effectiveness of the complex is confirmed by the test results of the measuring complex using a hydraulic stand.

Keywords: valve leakage, acoustic signal, operating frequency range, singular spectrum analysis, statistical hypothesis testing, errors of the first and second kind.

References

1. RD EO 1.1.2.01.0190-2010. Polozheniye po otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa truboprovodnoy armatury energoblokov atomnykh stantsiy [Regulations on the assessment of the technical condition and residual life of pipeline fittings of power units of nuclear power plants]. Moscow, 2016. 23 p. (In Russ.).
2. Seynov S. V., Goshko A. I., Adamenkov A. K. [et al.]. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye armatury AES [Technical diagnostics of NPP fittings]. Moscow, 2012. 452 p. (In Russ.).
3. NP-089-15. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [Rules for the design and safe operation of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, 2017. 72 p. (In Russ.).
4. Teju V., Bhavana D. An efficient object detection using OFSA for thermal imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education. 2020. No. 1 (22). P. 1–22. DOI: 10.1177/0020720920944434. (In Engl.).
5. Drobotov A. V. Metod diagnostirovaniya elektroprivodnoy armatury s kontrolem diagnosticheskikh parametrov i opyt yego primeneniya na Smolenskoy AES [Method for diagnosing electric valves with control of diagnostic parameters and experience of its application at the Smolensk NPP] // Armaturostroyeniye. Armaturostroyeniye. 2008. No. 1 (52). P. 52–60. (In Russ.).
6. Adamenkov A. K., Veselova I. N., Rysnny S. I. Metod otsenki germetichnosti truboprovodnoy armatury teplovykh i atomnykh stantsiy [Method of tightness evaluation of the nuclear and thermal power plant valves] // Tyazheloye mashinostroyeniye. Tyazheloye Mashinostroyeniye. 2008. No. 6. P. 2–3. (In Russ.).
7. Ispytaniya stendov «Krona-517» i «ATE Ts-3000» [Testing of stands «Krona-517» and «ATE TS-3000»]. URL: <http://npk-krona.ru/2015/03/ispytaniya-stendov-krona-517-i-ate-ts-3000> (accessed: 01.04.2020). (In Russ.).
8. Abidova E. A., Dembitsky A. E., Lapkis A. A., Chernov A. V. Synthesis of Control Systems for Complex Technical Objects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971, Issue 3. 032058. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/0320589. (In Engl.).
9. Chernov A. V., Abidova E. A., Khagay L. S. Diagnostika negermetichnosti v zatvore elektroprivodnoy armatury po entropiynym pokazatelyam zvukovykh i ul'trazvukovykh signalov [Diagnosis of leakage in the gate of electric drives by the entropy indicators of sound and ultrasonic signals] // Inzhenernyy vestnik Dona. Engineering Journal of Don. 2017. No. 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493> (accessed: 10.06.2023). (In Russ.).
10. Hassani J., Kalantari H., Beneki C. Comparative Assessment of Hierarchical Clustering Methods for Grouping in Singular Spectrum Analysis // Applied Math. 2021. Vol. 1 (1). P. 18–36. DOI: 10.3390/appliedmath1010003. (In Engl.).
11. Hassani H., Kalantari M. Automatic Grouping in Singular Spectrum Analysis // Forecasting. 2019. Vol. 1. P. 189–204. DOI: 10.3390/forecast1010013. (In Engl.).
12. Optimizatsiya metodov diagnostiki podshipnikov kacheniya po vysokochastotnoy vibratsii [Optimisation of methods of rolling bearings diagnostics by high-frequency vibration] // Metody i sredstva otsenki sostoyaniya energeticheskogo oborudovaniya. Methods and Means of Power Equipment Condition Assessment. 2002. Issue 15. URL: <https://masters.donntu.ru/2010/etf/prokopets/library/article5.htm> (accessed: 10.06.2023). (In Russ.).
13. Kilundu B., Dehombreux P., Letot C. [et al.]. Early detection of bearing damage by means of decision trees // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. 2009. Vol. 3. P. 70–74. (In Engl.).
14. Balaratnam N., Weidenauer J., Wagner F. [et al.]. Comparison of envelope demodulation methods in the analysis of rolling bearing damage // Journal of Vibration and Control. 2022. P. 1–12. DOI: 10.1177/10775463221129155. (In Engl.).
15. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis for Time Series. 2nd ed. New York: Springer, 2020. 146 p. (In Engl.).

16. Babenko R. G., Nikiforov V. N., Pugacheva O. Yu. [et al.]. Otsenka veroyatnosti obnaruzheniya defektov pri diagnostike oborudovaniya vibroakusticheskim metodom [Estimating the probability of defect detection in the equipment diagnosis by vibroacoustic method] // Global'naya yadernaya bezopasnost'. *Global Nuclear Safety*. 2014. No. 4. (13). P. 74–78. (In Russ.).

ABIDOVA Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Information and Control Systems Department, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology — branch of the National Research Nuclear University «MEPHI», Volgodonsk.

ORCID: 0000-0003-0258-5543

Correspondence address: 1nii_energomash@mail.ru

RATUSHNY Viktor Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Physical and

Mathematical Disciplines Department, Volgodonsk Institute of Engineering and Technology — branch of the National Research Nuclear University «MEPHI», Volgodonsk.

SPIN-code: 6826-4290

ORCID: 0000-0002-5701-6279

AuthorID (SCOPUS): 6603218775

Correspondence address: VIRatushnyj@mephi.ru

For citations

Abidova E. A., Ratushny V. I. Registration and signal processing in measuring system for monitoring leaks of NPP pipeline fittings // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 117–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-117-124.

Received July 19, 2023.

© E. A. Abidova, V. I. Ratushny

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРФОЛОГИЮ УГЛЕРОДНОГО СЛОЯ, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ХЛОРИРОВАННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА

Исследовано влияние предварительной термической обработки на морфологию углеродного слоя, формирующегося на поверхности хлорированного поливинилхлорида с добавкой ферроцена (10 % от массы полимера) под действием мощного ионного пучка наносекундной длительности. Предварительная термообработка приводит к частичному дегидрохлорированию поверхностного слоя полимерной пленки и межцепной сшивке, создавая центры для начала реакции карбонизации, и таким образом влияет на процесс формирования углеродных наноструктур при последующем облучении мощным ионным пучком. Рассмотрены возможные механизмы влияния предварительной термической обработки на формирование углеродных наноструктур. Установлено, что различные температуры термической обработки приводят к различным морфологиям получаемых углеродных наноструктур.

Ключевые слова: хлорированный поливинилхлорид, термическая обработка, мощный ионный пучок, дегидрохлорирование, карбонизация, углеродные нановолокна.

Введение. На сегодняшний день известно большое количество различных углеродных наноструктур, которые находят широкое применение в современной промышленности, так как обладают рядом уникальных свойств [1]. В частности, углеродные нановолокна применяются в сферах хранения энергии, биомедицинской отрасли [2–3]. Наноккомпозиты углеродных наноструктур с наночастицами оксидов металлов — в качестве селективных сенсоров, поглотителей электромагнитных волн, в сфере электрохимии [4–8]. В настоящее время углеродные наноструктуры рассматриваются как будущая элементная база нанoeлектроники. В связи с этим одним из важнейших направлений развития современного электронного производства является создание углеродных наноструктур на поверхности слоя полимерного материала, что значительно упростит создание нанoeлектронных компонентов [9]. Важным примером такого устройства являет-

ся микросуперконденсатор (МСК) — электронный компонент, ёмкость которого обусловлена ёмкостью двойного электрического слоя вблизи электрода с высокоразвитой поверхностью [10–12]. Это позволяет сочетать преимущества конденсатора (высокую скорость зарядки-разрядки, большой срок службы, низкую требовательность к условиям работы) с высокой удельной ёмкостью, сравнимой с показателями современных аккумуляторов. Важной задачей современной науки является создание электронных компонентов нанометровых размеров, в идеале — сразу на целевой подложке, предпочтительно тонкой и гибкой. Вариантом такого процесса является синтез углеродных наноструктур на поверхности органического полимера.

Одной из широко исследуемых в последние годы технологий является метод производства графена с помощью лазерного излучения [10–13]. Мощный лазерный луч направлялся на тонкую плёнку

из коммерческого полимера, чаще всего полиимида или хлорированного поливинилхлорида (ХПВХ) [14–15]. Лазерный луч позволяет удалить большую часть водорода и гетероатомов, оставляя лишь углерод, который при этом формируется в виде пористой графеновой плёнки — так называемого лазерно-индуцированного графена (ЛИГ). Как показали проведённые исследования, этот пористый графен обладает достаточно большой эффективной площадью поверхности, что делает его подходящим материалом для производства МСК. Также установлено, что ЛИГ состоит преимущественно из графена, что объясняет его высокую электропроводность и электрохимическую стабильность. Было дано объяснение высокой развитости поверхности. При лазерном облучении поверхность плёнки сильно нагревается, в результате чего происходит термодеструкция, а при использовании ультрафиолетового лазера — и фотолиз. Углерод образует графеновые чешуйки, а водород и гетероэлементы, входившие в состав исходного полимера, удаляются с поверхности в составе различных неорганических и низкомолекулярных органических газообразных веществ. Если образование газообразных продуктов происходит в объёме полимера, то формируется газовый пузырь, который затем выходит на поверхность. При этом канал выхода газового пузырька остаётся легкопроницаемым для электролита, что в дальнейшем обуславливает высокие электрохимические показатели МСК.

Альтернативной методикой получения углеродных наноструктур на поверхности полимера является облучение полимерной плёнки мощным ионным пучком наносекундной длительности (МИП) [16–17]. Преимуществами ионного воздействия по сравнению с лазерной технологией является гораздо большая площадь воздействия, что позволяет во многих случаях избежать нежелательных эффектов на стыке дорожек облучения, характерных для лазерной обработки образцов с большой площадью, и высокая эффективность передачи энергии любому материалу мишени, в то время как ряд материалов плохо поглощает оптическое излучение в некоторых диапазонах длин волн. В Омском государственном университете им. Ф. М. Достоевского (ОмГУ) проводились исследования облучения МИП ХПВХ с добавкой ферроцена. При облучении с плотностью тока ионного пучка 50 А/см^2 в поверхностном слое материала образуется массив выступов и мелких пор диаметром 100 и 75 нм соответственно, при этом среднее содержание хлора падает в четыре раза. При плотности ионного тока 100 А/см^2 на поверхности полимера формируется слой из коротких нановолокон длиной до 10 мкм и средним диаметром 80 нм. Основным механизмом взаимодействия МИП с материалом мишени при этом считают термическое воздействие.

Установлено, что процесс образования углеродных нановолокон под действием МИП на хлорполимеры хорошо протекает при добавке в полимер ферроцена, в результате термического разложения которого образуются наночастицы железа, а сам ферроцен является кислотой Льюиса. Исходя из этого, можно предположить следующий механизм реакции [18–19]. По-видимому, сначала происходит дегидрохлорирование по ионному механизму, первой стадией которого является отщепление аниона хлора, происходящее преимущественно у третичных атомов углерода или в β -положении, что приводит к образованию сопряжённых двой-

ных связей. Затем происходит сшивка соседних цепей по реакции Дильса–Альдера. Результатом чередования этих реакций является образование полиароматических фрагментов, однако идеальная графеновая структура не может образоваться, что обуславливается малым временем воздействия МИП, а также неполным хлорированием исходного ХПВХ (обычно атомное отношение $\text{Cl/H} \approx 0,5$, то есть в β -положении к двойной связи может не оказаться атома хлора) [20].

Предварительное частичное дегидрохлорирование, например, термоокислительное старение, может ускорить начальные стадии реакции, поскольку результатом сшивки полимерных цепей будут третичные атомы углерода [21–22]. Следствием этого может стать более глубокое протекание реакции. Также положительным фактором предварительной термической обработки облучаемого исходного полимера независимо от среды, в которой она происходит, будет частичное предварительное дегидрохлорирование, создающее двойные связи [23–24]. Кроме того, сшивка, по нашему предположению, может способствовать снижению выхода побочной реакции разрушения углеродной цепи с образованием низкомолекулярных летучих органических соединений.

В ходе исследования мы планировали подтвердить гипотезу о положительном влиянии предварительной термической обработки на морфологию углеродных наноструктур, образующихся в результате облучения образца из ХПВХ с помощью МИП, а также установить наиболее подходящую температуру для такой обработки.

Методика эксперимента. Исследовано воздействие мощного ионного пучка на тонкие слои ХПВХ, содержащие в качестве катализатора ферроцен $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2]$. Слой ХПВХ (толщиной до 100 мкм) наносится на подложки из натрий-силикатного стекла из раствора данного полимера в ацетоне с добавлением ферроцена (10 % от массы полимера). Для удаления растворителя из нанесённого слоя образцы выдерживали в течение нескольких суток при комнатной температуре.

Облучение образцов проводилось на ускорителе «Темп» пучком ионов с энергией $E \approx 200 \text{ кэВ}$, длительностью $\tau = 60 \text{ нс}$, в диапазоне плотностей тока $50\text{--}150 \text{ А/см}^2$, состав пучка — 70 % C^+ и 30 % H^+ . Оценочные значения пробегов используемых в эксперименте ионов в ХПВХ составляют около 0,7 мкм для ионов углерода и около 4 мкм — для ионов водорода.

Было предположено, что на результате облучения может положительно сказаться предварительная обработка образца, направленная на частичное дегидрохлорирование и, в некоторых случаях, межцепную сшивку полимера. Поскольку время воздействия МИП на плёнку в процессе облучения мало, это может привести к повышению кристаллического качества образующихся углеродных наноструктур, однако, с другой стороны, отрицательным эффектом может стать снижение газовой выделенности, являющегося, вероятно, одной из движущих сил роста углеродных нановолокон [16, 25]. Для этого образцы перед облучением медленно, в течение 10–15 минут, доводились до температур 100, 150 и 200 °С в печи в атмосферном воздухе и при атмосферном давлении и выдерживались в течение 1 часа, после чего остывали на воздухе.

Морфология поверхности исследовалась с использованием метода растровой электронной ми-

Статистические данные по волокнам, формируемым на поверхности ХПВХ

	Конт- рольный	100 °С	150 °С	200 °С
Наиболее вероятный диаметр, нм	30 – 50	50 – 70	30 – 50	30 – 50
Средний диаметр, нм	42	87	36	58
Средняя длина, нм	467	950	990	1110
Количество волокон на единицу площади, мкм ⁻²	18	5	4	3
Площадь поверхности волокон относительно исходной площади подложки, %	121	150	54	62

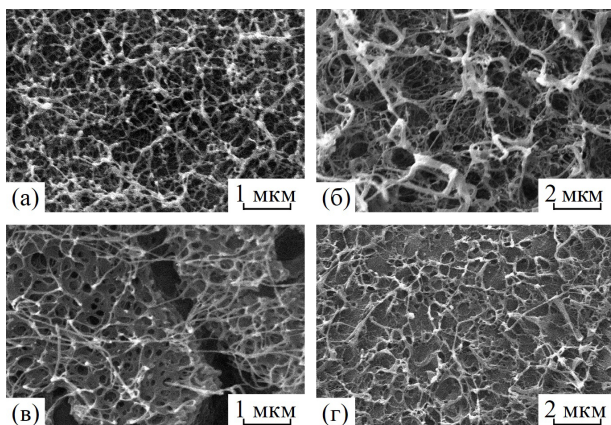


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности ХПВХ с добавкой ферроцена после облучения: (а) без предварительной термообработки; (б) после термообработки при 100 °С; (в) — при 150 °С; (г) — при 200 °С

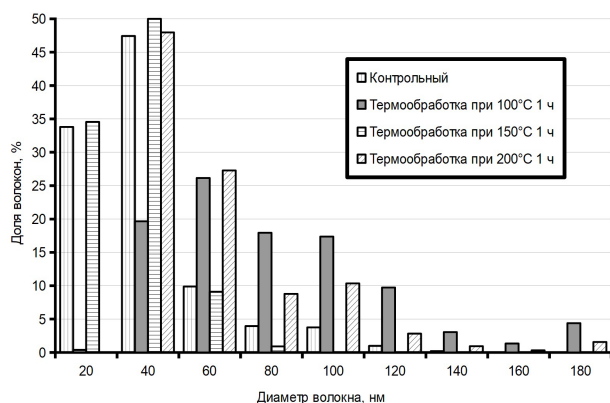


Рис. 2. Распределение волокон по диаметру

кроскопии (JSM-6610LV, JEOL с энергодисперсионным анализатором Inca-350).

Результаты и их обсуждение. Из проведенных ранее исследований [16] известно, что при облучении МИП ХПВХ, не подвергавшегося предварительной обработке, на поверхности образуется густая сеть волокон, состоящих из аморфного углерода, диаметр которых составляет несколько десятков нанометров. При облучении МИП ХПВХ, подвергнутого предварительно термической обработке, морфология поверхности отличается от контрольного (без предварительной термообработки) образца (рис. 1). На образце, подвергнутом предварительной термообработке при 100 °С (рис. 1б), по-прежнему наблюдается большое количество густо переплетенных между собой волокон, однако они отличаются от волокон контрольного образца по геометрическим размерам. Как и на первом образце, на поверхности образца не наблюдается никаких других видов наноструктур, кроме волокон. Для образца, подвергнутого предварительной термообработке при 150 °С (рис. 1в), видны отличия морфологии поверхности. Наиболее крупные волокна, наблюдаемые ранее, здесь отсутствуют, вместо этого наблюдается пористый массив, над которым присутствуют немногочисленные длинные тонкие волокна. Предварительная термообработка при 200 °С приводит практически к полному ис-

чезновению пор, над поверхностью образуется неравномерная сеть волокон (рис. 1г).

Как видно из экспериментальных гистограмм распределения количества волокон по диаметру (рис. 2), для всех исследованных образцов распределение демонстрирует сходное поведение: на небольших диаметрах наблюдается довольно отчетливый единственный максимум, после которого с ростом диаметра в следующих интервалах, как правило, количество волокон существенно меньше. При этом в данной части распределения характерным является плато, природа которого неизвестна. Между количеством волокон с диаметрами 70–90 и 90–110 нм разница несущественна. Также для двух температур обработки наблюдается небольшой локальный максимум распределения в области диаметров 170–190 нм.

Также из приведенных гистограмм и СЭМ-изображений поверхности видно, что предварительная термообработка материала при температуре 150 °С приводит к иной морфологии, чем наблюдается при других температурах предварительной термической обработки и у контрольного образца. Максимум распределения в этом случае является существенно более резким, то есть большинство волокон близки между собой по диаметру, а крупные поры, то есть практически губчатая структура вещества под волокнами, могут быть полезными в некоторых применениях.

Из данных по волокнам, формируемым на поверхности ХПВХ в зависимости от температуры предварительной обработки (табл. 1), следует, что количество волокон, приходящихся на единицу площади образца, при облучении предварительно подвергнутого термообработке на воздухе ХПВХ оказывается в несколько раз меньшим, чем при облучении контрольного образца. При этом чем выше температура термообработки, тем меньше оказывается концентрация волокон на поверхности облученного полимера. Отношение площади волокон к площади исходной поверхности образца после термообработки при 100 °С увеличивается на четверть, однако при увеличении температуры предварительной обработки существенно уменьшается, что уже было отмечено выше как изменение морфологии поверхности. Вместе с тем остается невыясненной тенденция изменения полной площади поверхности образующихся на поверхности облученного полимера структур, поскольку скани-

рующая электронная микроскопия поверхности не позволяет изучить структуры на всю глубину модифицированного облучением слоя образца.

Предварительная термообработка также влияет и на геометрические размеры самих волокон. Предварительная термообработка при 100 °С приводит к резкому росту всех параметров волокон — средней длины, наиболее вероятного и среднего диаметров. Далее средняя длина волокон продолжает расти, что, по-видимому, связано с уменьшением их взаимодействия между собой в процессе роста ввиду уменьшения их концентрации. Наиболее вероятный диаметр увеличивается для образца, термообработанного при 100 °С, по сравнению с контрольным образцом, но возвращается к исходным (с учётом погрешностей измерения) значениям при больших температурах термообработки. Средний же диаметр волокна демонстрирует немонотонную зависимость от температуры предварительной термообработки. При 100 °С наблюдается резкое увеличение, а при 150 °С — существенное уменьшение.

Закключение. Проведённые эксперименты показали, что импульсное ионное облучение приводит к дегидрохлорированию поверхностного слоя полимера и образованию углерода, в частности углеродных нановолокон, позволили оценить влияние предварительной термообработки облучаемого полимера на воздухе на морфологию поверхности облучённого образца. Установлено, что предварительная термообработка приводит к различным морфологиям поверхности облучённых образцов. Часть волокон при повышении температуры предварительной термообработки постепенно замещаются массивом беспорядочно сросшихся перфорированных углеродных чешуек. Оставшиеся волокна заметно удлинняются, данные по диаметрам при этом не показывают монотонной зависимости. Вместе с тем остаются невыясненными причины существенного утолщения волокон при предварительной термической обработке при 100 °С и значительного увеличения количества тонких волокон после предварительной обработки при температуре 150 °С. Предварительная термическая обработка при температуре 150 °С в течение часа позволяет получить средний диаметр нановолокон 36 нм, что является минимальным значением в исследуемом диапазоне. Уменьшение размера волокон приводит к значительному увеличению площади взаимодействующей поверхности.

Библиографический список

1. Агеев О. А., Ильин О. И., Климин В. С. [и др.]. Исследование режимов формирования и модификации ориентированных массивов углеродных нанотрубок методом PECVD на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки (Тематический выпуск: нанотехнологии). 2011. № 4 (117). С. 69–77.
2. Zhou X., Wang Y., Gong C. Production, structural design, functional control, and broad applications of carbon nanofiber-based nanomaterials: A comprehensive review // Chemical Engineering Journal. 2020. Vol. 402. P. 126189. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126189.
3. Yadav D., Amini F., Ehrmann A. Recent advances in carbon nanofibers and their applications — A review // European Polymer Journal. 2020. Vol. 138. P. 109963. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109963.
4. VEDIYAPPAN V., SIVAKUMAR M., CHEN S.-M. [et al.]. Nanolayers of carbon protected copper oxide nanocomposite for high performance energy storage and non-enzymatic glucose

- sensor // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 875. P. 160063. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160063.
5. Sridara T., Upan J., Saianand G. [et al.]. Non-Enzymatic Amperometric Glucose Sensor Based on Carbon Nanodots and Copper Oxide Nanocomposites Electrode // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 808. DOI: 10.3390/s20030808.
6. Shu R., Li W., Wu Y. [et al.]. Fabrication of nitrogen-doped cobalt oxide/cobalt/carbon nanocomposites derived from heterobimetallic zeolitic imidazolate frameworks with superior microwave absorption properties // Composites Part B. 2019. Vol. 178. P. 107518. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107518.
7. Shu R., Wu Y., Zhang J. [et al.]. Facile synthesis of nitrogen-doped cobalt/cobalt oxide/carbon/reduced graphene oxide nanocomposites for electromagnetic wave absorption // Composites Part B. 2020. Vol. 193. P. 108027. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108027.
8. Wang K., Liu C., Wang W. [et al.]. Synthesis and electrochemical performance of nickel–cobalt oxide/carbon nanocomposites for use in efficient oxygen evolution reaction // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2019. Vol. 30. P. 4144–4151. DOI: 10.1007/s10854-019-00706-5.
9. Chyan Y., Ye R., Li Y. [et al.]. Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food // ACS Nano. 2018. Vol. 12, no. 3. P. 2176–2183. DOI: 10.1021/acsnano.7b08539.
10. Peng Z., Lin J., Ye R. [et al.]. Flexible and Stackable Laser Induced Graphene Supercapacitors // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. Vol. 7, no. 5. P. 3414–3419. DOI: 10.1021/am509065d.
11. Lamberti A., Perrucci F., Caprioli M. [et al.]. New insights on laser induced graphene electrodes for flexible supercapacitors: tunable morphology and physical properties // Nanotechnology. 2017. Vol. 28, no. 17. P. 174002. DOI: 10.1088/1361-6528/aa6615.
12. Lamberti A., Clerici F., Fontana M. [et al.]. A Highly Stretchable Supercapacitor Using Laser-Induced Graphene Electrodes onto Elastomeric Substrate // Advanced Energy Materials. 2016. Vol. 6. P. 1600050. DOI: 10.1002/aenm.201600050.
13. Lin J., Peng Z., Liu Y. [et al.]. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // Nature communications. 2014. Vol. 5. P. 5714. DOI: 10.1038/ncomms5714.
14. Shimoyama M., Niino H., Yabe A. A KrF excimer laser induced dehydrochlorination of a chlorinated poly(vinylchloride): preparation of conjugated polyene and polyyne // Macromol. Chem. 1992. Vol. 193 (3). P. 569–574. DOI: 10.1002/macp.1992.021930301.
15. Liu J., Shimanoe H., Ko S. [et al.]. Highly Chlorinated Polyvinyl Chloride as a Novel Precursor for Fibrous Carbon Material // Polymers. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 328. DOI: 10.3390/polym12020328.
16. Ковивчак В. С., Кряжев Ю. Г., Запелова Е. С. Формирование наноструктурированного углеродного материала на поверхности полимера, содержащего ферроцен, при воздействии мощного ионного пучка // Письма в журнал технической физики. 2016. Т. 42, № 3. С. 84–90.
17. Ковивчак В. С. Особенности воздействия мощного ионного пучка наносекундной длительности на полиэтилен-терефталат // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 3. С. 11–15. DOI: 10.31857/S1028096023030068.
18. Ковивчак В. С., Кряжев Ю. Г. Формирование наноструктурированного углерода на поверхности хлорполимеров при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 12-й Междунар. конф., 19–22 сент. 2017 г. Минск, Беларусь, 2017. С. 56–57.
19. Донцов А. А., Лозовик Г. Я., Новицкая С. П. Хлорированные полимеры. Москва: Химия, 1979. 232 с.

20. Ковивчак В. С., Парыгин А. А. Влияние предварительного ультрафиолетового облучения на формирование углеродных нановолокон на поверхности хлорированного поливинилхлорида при воздействии мощного ионного пучка // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 3. С. 44–49. DOI: 10.31857/S1028096022030116.

21. Liu J., Lv Y., Luo Z. [et al.]. Molecular chain model construction, thermostability, and thermo-oxidative degradation mechanism of poly (vinyl chloride) // RCS Advances. 2016. Vol. 6. P. 31898–31905. DOI: 10.1039/c6ra02354a.

22. Тарасов И. Ю. Стабилизация поливинилхлорида // Современная наука: эксперимент и научная дискуссия: сб. науч. тр. по материалам II Междунар. науч.-практ. конф., 25 апреля 2022 г. Анапа, 2022. С. 60–66.

23. Стрепихеев А. А., Деревицкая В. А. Основы химии высокомолекулярных соединений. Москва: Химия, 1976. 440 с.

24. Та К. К., Бондалетов В. Г., Огородников В. Д. [и др.]. Термоокислительная деструкция композиций полидициклопентадиена с хлорсодержащими антипиренами // Пластические массы. 2020. № 11-12. С. 8–10. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-8-10.

25. Парыгин А. А. Влияние предварительной дегидрохлорирующей обработки на поверхностную морфологию хлорированного поливинилхлорида, облученного мощным ионным пучком // Научный форум: технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам LVIII Междунар. науч.-практ. конф., 07 ноября 2022 г. Москва, 2022. Т. 8, № 58. С. 27–31.

КОВИВЧАК Владимир Степанович, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры общей и экспериментальной физики Омского государственного университета им. Ф. М. Достоевского (ОмГУ), г. Омск; старший научный сотрудник лаборатории функциональной электроники Института радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН, г. Омск.

SPIN-код: 2028-1503

AuthorID (РИНЦ): 37657

AuthorID (SCOPUS): 6603186738

ResearcherID: A-3942-2014

Адрес для переписки: kvs_docent@mail.ru

ПАРЫГИН Аркадий Алексеевич, аспирант направления подготовки «Физика и астрономия» ОмГУ, г. Омск.

Адрес для переписки: rusik2462@yandex.ru

Для цитирования

Ковивчак В. С., Парыгин А. А. Влияние предварительной термической обработки на морфологию углеродного слоя, формирующегося на поверхности хлорированного поливинилхлорида при воздействии мощного ионного пучка // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 125–131. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-125-131.

Статья поступила в редакцию 09.06.2023 г.

© В. С. Ковивчак, А. А. Парыгин



THE INFLUENCE OF PRELIMINARY HEAT TREATMENT ON MORPHOLOGY OF CARBON LAYER FORMED ON SURFACE OF CHLORINATED POLYVINYL CHLORIDE UNDER THE IMPACT OF A HIGH-POWER ION BEAM

The effect of preliminary heat treatment on the morphology of carbon layer formed on the surface of chlorinated polyvinyl chloride with the addition of ferrocene (10 % of polymer weight) under the impact of a high-power nanosecond-durable ion beam has been studied. Preliminary exposure of samples in an oven at different temperatures for 1 hour leads to partial dehydrochlorination of the surface layer of the polymer film and interchain crosslinking, creating centers for the start of the carbonization reaction, and thus affects the formation of carbon nanostructures during subsequent irradiation with a high-power ion beam. The possible mechanism of carbon nanostructures formation from chlorinated polyvinyl chloride under the impact of a high-power ion beam and the mechanism of the influence of preliminary heat treatment on it are considered. It has been established that different heat treatment temperatures lead to different morphologies of the resulting carbon nanostructures. On the control sample and the sample subjected to heating to 100 °C, only nanofibers are formed, preheating to 150 °C leads to the formation of a porous structure with nanosized pores under the nanofibers, and preheating to 200 °C leads to a significant decrease in the porosity and concentration of nanofibers.

Keywords: chlorinated polyvinyl chloride, heat treatment, high-power ion beam, dehydrochlorination, carbonization, carbon nanofibers.

References

1. Ageyev O. A., Il'in O. I., Klimin V. S. [et al.]. Issledovaniye rezhimov formirovaniya i modifikatsii oriyentirovannykh massivov uglerodnykh nanotrubok metodom PECVD na nanotekhnologicheskoy komplekse NANOFAB NTK-9 [Investigation of modes of formation and modification of oriented arrays of carbon nanotubes by the PECVD method on the nanotechnological complex NANOFAB NTK-9] // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki (Tematicheskiy vypusk: nanotekhnologii). Proceedings of the Southern Federal University. Engineering Sciences (Thematic Issue: Nanotechnologies)*. 2011. Vol. 4 (117). P. 69–77. (In Russ.).
2. Zhou X., Wang Y., Gong C. Production, structural design, functional control, and broad applications of carbon nanofiber-based nanomaterials: A comprehensive review // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 402. P. 126189. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126189. (In Engl.).
3. Yadav D., Amini F., Ehrmann A. Recent advances in carbon nanofibers and their applications — A review // *European Polymer Journal*. 2020. Vol. 138. P. 109963. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109963. (In Engl.).
4. VEDIYAPPAN V., SIVAKUMAR M., CHEN S.-M. [et al.]. Nanolayers of carbon protected copper oxide nanocomposite for high performance energy storage and non-enzymatic glucose sensor // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 875. P. 160063. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160063. (In Engl.).
5. Sridara T., Upan J., Saianand G. [et al.]. Non-Enzymatic Amperometric Glucose Sensor Based on Carbon Nanodots and Copper Oxide Nanocomposites Electrode // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 808. DOI: 10.3390/s20030808. (In Engl.).
6. Shu R., Li W., Wu Y. [et al.]. Fabrication of nitrogen-doped cobalt oxide/cobalt/carbon nanocomposites derived from heterobimetallic zeolitic imidazolate frameworks with superior microwave absorption properties // *Composites Part B*. 2019. Vol. 178. P. 107518. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107518. (In Engl.).
7. Shu R., Wu Y., Zhang J. [et al.]. Facile synthesis of nitrogen-doped cobalt/cobalt oxide/carbon/reduced graphene oxide nanocomposites for electromagnetic wave absorption // *Composites Part B*. 2020. Vol. 193. P. 108027. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108027. (In Engl.).

8. Wang K., Liu C., Wang W. [et al.]. Synthesis and electrochemical performance of nickel–cobalt oxide/carbon nanocomposites for use in efficient oxygen evolution reaction // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30. P. 4144–4151. DOI: 10.1007/s10854-019-00706-5. (In Engl.).
9. Chyan Y., Ye R., Li Y. [et al.]. Laser-Induced Graphene by Multiple Lasing: Toward Electronics on Cloth, Paper, and Food // *ACS Nano*. 2018. Vol. 12, no. 3. P. 2176–2183. DOI: 10.1021/acsnano.7b08539. (In Engl.).
10. Peng Z., Lin J., Ye R. [et al.]. Flexible and Stackable Laser Induced Graphene Supercapacitors // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7, no. 5. P. 3414–3419. DOI: 10.1021/am509065d. (In Engl.).
11. Lamberti A., Perrucci F., Caprioli M. [et al.]. New insights on laser induced graphene electrodes for flexible supercapacitors: tunable morphology and physical properties // *Nanotechnology*. 2017. Vol. 28, no. 17. P. 174002. DOI: 10.1088/1361-6528/aa6615. (In Engl.).
12. Lamberti A., Clerici F., Fontana M. [et al.]. A Highly Stretchable Supercapacitor Using Laser-Induced Graphene Electrodes onto Elastomeric Substrate // *Advanced Energy Materials*. 2016. Vol. 6. P. 1600050. DOI: 10.1002/aenm.201600050. (In Engl.).
13. Lin J., Peng Z., Liu Y. [et al.]. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers // *Nature communications*. 2014. Vol. 5. P. 5714. DOI: 10.1038/ncomms5714. (In Engl.).
14. Shimoyama M., Niino H., Yabe A. A KrF excimer laser induced dehydrochlorination of a chlorinated poly(vinylchloride): preparation of conjugated polyene and polyyne // *Macromol. Chem.* 1992. Vol. 193 (3). P. 569–574. DOI: 10.1002/macp.1992.021930301. (In Engl.).
15. Liu J., Shimanoe H., Ko S. [et al.]. Highly Chlorinated Polyvinyl Chloride as a Novel Precursor for Fibrous Carbon Material // *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 328. DOI: 10.3390/polym12020328. (In Engl.).
16. Kovivchak V. S., Kryazhev Yu. G., Zapevalova E. S. Formirovaniye nanostrukturirovannogo uglerodnogo materiala na poverkhnosti polimera, sodержashchego ferrotsen, pri vozdeystvii moshchnogo ionnogo puchka [Formation of nanostructured carbon material on the surface of a ferrocene-containing polymer under the influence of a high-power ion beam] // *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki. Technical Physics Letters*. 2016. Vol. 42, no. 3. P. 84–90. (In Russ.).
17. Kovivchak V. S. Osobennosti vozdeystviya moshchnogo ionnogo puchka nanosekundnoy dlitel'nosti na polietilenterefalat [Features of the effect of a high-power ion beam of nanosecond duration on polyethylene terephthalate] // *Poverkhnost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2023. No. 3. P. 11–15. DOI: 10.31857/S1028096023030068. (In Russ.).
18. Kovivchak V. S., Kryazhev Yu. G. Formirovaniye nanostrukturirovannogo ugleroda na poverkhnosti khloropolimerov pri vozdeystvii moshchnogo ionnogo puchka nanosekundnoy dlitel'nosti [Formation of nanostructured carbon on a surface of chlorinated polymers under the action of a high power ion beam of nanosecond duration] // *Vzaimodeystviye izlucheniya s tverdyim telom. Interaction of Radiation with Solids*. Minsk, 2017. P. 56–57. (In Russ.).
19. Dontsov A. A., Lozovik G. Ya., Novitskaya S. P. Khlorirovannyye polimery [Chlorinated polymers]. Moscow, 1979. 232 p. (In Russ.).
20. Kovivchak V. S., Parygin A. A. Vliyaniye predvaritel'nogo ul'trafiol'tovogo oblucheniya na formirovaniye uglerodnykh nanovolokon na poverkhnosti khlorirovannogo polivinilkhlorida pri vozdeystvii moshchnogo ionnogo puchka [Influence of UV pre-irradiation on the formation of carbon nanofibers on the surface of chlorinated polyvinyl chloride under the action of a high power ion beam] // *Poverkhnost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyy i neytronnyy issledovaniya. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022. No. 3. P. 44–49. DOI: 10.31857/S1028096022030116. (In Russ.).
21. Jia Liu, Yin Lv, Zhidong Luo [et al.]. Molecular chain model construction, thermostability, and thermo-oxidative degradation mechanism of poly (vinyl chloride) // *RCS Advances*. 2016. Vol. 6. P. 31898–31905. DOI: 10.1039/c6ra02354a. (In Engl.).
22. Tarasov I. Yu. Stabilizatsiya polivinilkhlorida [Stabilization of polyvinyl chloride] // *Sovremennaya nauka: eksperiment i nauchnaya diskussiya. Modern Science: Experiment and Scientific Discussion*. Anapa, 2022. P. 60–66. (In Russ.).
23. Strepikheyev A. A., Derevitskaya V. A. Osnovy khimii vysokomolekulyarnykh soyedineniy [Fundamentals of chemistry of macromolecular compounds]. Moscow, 1976. 440 p. (In Russ.).
24. Ta K. K., Bondaletov V. G., Ogorodnikov V. D. [et al.]. Termookislitel'naya destruktziya kompozitsiy poliditsiklopentadiyena s khlorosoderzhashchimi antipirenamiyami [Thermo-oxidative degradation of compositions of polydicyclopentadiene with chlorine-containing flame retardants] // *Plasticheskiye massy. Plastic Masses*. 2020. No. 11-12. P. 8–10. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-8-10. (In Russ.).
25. Parygin A. A. Vliyaniye predvaritel'noy degidrokhloriguyushchey obrabotki na poverkhnostnyuyu morfologiyu khlorirovannogo polivinilkhlorida, obluchennogo moshchnym ionnym puchkom [Influence of preliminary dehydrochlorinating treatment on the surface morphology of chlorinated polyvinyl chloride irradiated with a high-power ion beam] // *Nauchnyy forum: tekhnicheskkiye i fiziko-matematicheskkiye nauki. Scientific Forum: Technical and Physical and Mathematical Sciences*. 2022. Vol. 8, no. 58. P. 27–31. (In Russ.).

KOVIVCHAK Vladimir Stepanovich, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Associate Professor of General and Experimental Physics Department, Dostoevsky Omsk State University (OmsU), Omsk; Senior Researcher of Functional Electronics Laboratory, Institute of Radiophysics and Physical Electronics, Omsk Scientific Center SB RAS, Omsk.

SPIN-code: 2028-1503

AuthorID (RSCI): 37657

AuthorID (SCOPUS): 6603186738

ResearcherID: A-3942-2014

Correspondence address: kvs_docent@mail.ru

PARYGIN Arkadiy Alekseyevich, Graduate Student in the field Physics and Astronomy, OmsU, Omsk.

Correspondence address: rusik2462@yandex.ru

For citations

Kovivchak V. S., Parygin A. A. The influence of preliminary heat treatment on morphology of carbon layer formed on surface of chlorinated polyvinyl chloride under the impact of a high-power ion beam // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 125–131. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-125-131.

Received June 09, 2023.

© V. S. Kovivchak, A. A. Parygin



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА В САПР KEYSIGHT ADS

В статье предложен метод к проектированию термокомпенсированного кварцевого генератора в САПР Keysight ADS, который позволяет: исследовать условия возникновения автоколебаний в заданной схеме генератора; проанализировать температурно-частотные характеристики резонатора; сформировать требования к функции управления частотой; моделировать шумовые характеристики генератора; выполнить оптимизацию схемы по заданным параметрам. В отличие от известного численного проектирования термокомпенсированного кварцевого генератора в SPICE программах с последующим анализом результатов в математической программе, например, Mathcad предложенный метод позволяет исследовать форму колебаний, спектральную чистоту выходного сигнала, учитывать нелинейное влияние схемы и более тонкие эффекты.

Ключевые слова: кварцевый генератор, резонатор, термокомпенсация, САПР Keysight ADS, генератор Колпитца, SPICE программа.

Актуальность. К термокомпенсированным кварцевым генераторам предъявляются весьма жесткие требования по стабильности выходной частоты. При их проектировании необходимо не только определить точное значение частоты при какой-то температуре (например, 20 °C), но и форму всей температурно-частотной характеристики (ТЧХ), а также характеристику управления частотой управляющим напряжением [1]. Нелинейность характеристики управления может существенно усложнить процесс термокомпенсации. Таким образом, проектировщику в процессе разработки схемы генератора необходимо иметь возможность рассчитывать номинал выходной частоты, пределы перестройки и нелинейность характеристики управления.

Кварцевые генераторы являются нелинейными колебательными системами, форма и частота выходных колебаний которых может быть получена в результате решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. Для реальной схемы генератора система уравнений является весьма сложной и трудно решаемой. Разработанные методы приближенного решения этих систем (метод медленно меняющихся амплитуд, метод Ван Дер Поля, метод Пуанкаре [2], метод укороченных уравнений Евтянова [3] и др. все равно остаются достаточно сложными для использования в инженерных задачах и в практической деятельности используются редко.

Для инженерных расчетов обычно используются более простые методики [4–6], основанные не на решении системы дифференциальных уравнений, а на анализе баланса амплитуд и фаз, как условия самовозбуждения колебаний. Такие методики не позволяют определять реальную форму

колебаний, учитывать нелинейное влияние схемы и более тонких эффектов, таких как влияние высших гармоник на сдвиг частоты колебаний [7].

С появлением методов моделирования электронных схем на ЭВМ появились попытки использования этих программ для анализа кварцевых генераторов, однако их использование столкнулось с рядом сложностей. Большинство программ моделирования электронных устройств на уровне принципиальных схем (программные пакеты MiltiSim (Electronics Workbench), MicroCAP, CircuitMaker и др.) в качестве вычислительного ядра используют программу SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Перечисленные САПР отличаются простотой и доступностью, однако не имеют в своем составе средств для моделирования автогенератора, поскольку основные доступные виды анализа — это анализ режима по постоянному току; анализ отклика схемы на вариации источников постоянного напряжения (тока) и иных параметров составляющих цепь компонентов; исследование частотных характеристик схемы, линеаризованной в окрестности рабочей точки; исследование переходных процессов при воздействии сигналов, задаваемых в виде функций времени. Специфической сложностью моделирования кварцевых генераторов в SPICE программах является высокая добротность резонатора (как минимум — десятки тысяч, а для высокодобротных образцов — более миллиона), приводящая к необходимости решения сотен тысяч уравнений, что занимает нереально большое время моделирования. При этом в [8] при моделировании генератора в программе NI Multisim (одна из лучших SPICE-программ) вообще делается вывод, что достоверность полученных в результате моделиро-

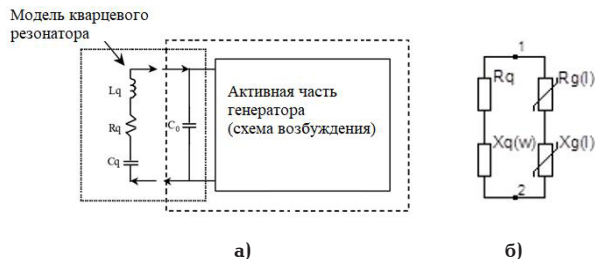


Рис. 1. Биполярное представление генератора (генератор в виде параллельного соединения двухполюсников)

вания параметров генератора будет невысока, так как слишком много факторов могут влиять на работоспособность схемы или приводить к несоответствию полученных результатов реальным схемам, и строить модели кварцевых генераторов в программе NI Multisim нецелесообразно. Это совпадает с выводами и других исследователей. Типовое решение проблемы — замена в схеме высокодобротного кварцевого резонатора на низкодобротный LC-контур позволяет смоделировать колебания, но их форма и частота очень далеки от реальных. Для точных расчетов такой метод неприемлем. Другим принципиальным ограничением использования численно-аналитического метода моделирования кварцевых генераторов в программах SPICE является невозможность подключения PDK (Process Design Kit) — набора файлов, используемых в полупроводниковой промышленности для разработки интегральной схемы и тем самым обеспечения сквозного проектирования и контроля характеристик генератора.

Рядом ученых [9–16] активно разрабатывалась методика моделирования высокостабильных генераторов, основанная на дипольном представлении схемы генератора (линейная узкополосная схема резонатора плюс широкополосная нелинейная схема каскада возбуждения (рис. 1 [14])).

Данный метод хорошо моделирует нелинейные свойства активной части схемы и позволяет учитывать изменение этой нелинейности от тока через резонатор, что является основой точности моделирования, однако встроенные средства SPICE программ не позволяют полностью решить задачу моделирования генератора. В [13] предложена гибридная численно-аналитическая методика моделирования кварцевых генераторов, в которой:

- SPICE — программа анализирует зависимость активного и реактивного сопротивления активной части (рис. 1) генератора от тока через резонатор;

- эта зависимость аппроксимируется полиномом n -ой степени в любой математической программе (MathCAD или MATLAB);

- в схеме рис. 1а кварцевый резонатор представляется суммой двух сопротивлений R_q (активная часть сопротивления резонатора) и $X_q(\omega)$ (мнимая часть, зависящая от частоты), а активная часть моделируется двумя последовательно соединенными сопротивлениями $R_g(i)$ (активная часть входного сопротивления как функция входного тока) и $X_g(i)$ (реактивная часть входного сопротивления как функция входного тока) (рис. 1б);

- полученная формула (полином) подставляется как параметр нелинейности в схему на рис. 1б $R_g(i)$ и $X_g(i)$. При этом

1. Условия самовозбуждения. Задаются неравенством:

$$Rq + Rg(0) < 0, \quad (1)$$

где $Rg(0)$ — активное сопротивление схемы возбуждения при нулевом токе резонатора. Граница области самовозбуждения определяется максимальным сопротивлением резонатора, при котором автогенератор способен самовозбуждаться и находится из равенства $Rq + Rg(0) = 0$.

2. Параметры стационарного режима. Амплитуда и частота колебаний определяются из условий баланса амплитуд и фаз, которые для эквивалентной схемы рис. 1б имеют вид:

$$Rq + Rg(I) = 0. \quad (2)$$

$$Xq(w) + Xg(I) = 0. \quad (3)$$

Уравнение (2) определяет величину тока резонатора в стационарном режиме. На основе (3) рассчитывается частота колебаний и частотная расстройка. Расчет других параметров (напряжений в узлах схемы, выходной мощности и др.) производится в программах моделирования в режиме transient (расчет переходных процессов) при замене резонатора эквивалентным источником гармонического тока с параметрами, соответствующими стационарному режиму.

3. Переходные процессы установления амплитуды и частоты колебаний в резонаторе. Расчет переходных процессов производится путем решения нелинейного дифференциального уравнения, которое для эквивалентной схемы рис. 1б имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} - w_q \cdot \frac{1}{Q} \left(\frac{-Rg(I)}{Rq} - 1 \right) \frac{di}{dt} + w_q^2 \left(\frac{Xg(I)}{Xq(w_q)} + 1 \right) i = 0, \quad (4)$$

где Q — добротность резонатора, $w_q^2 = \frac{1}{Lq \cdot Cq}$.

Укороченные дифференциальные уравнения для амплитуды и фазы колебаний получены методом медленно меняющихся амплитуд и записываются в виде:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I \cdot w_q}{2Q} \left(\frac{-Rg(I)}{Rq} - 1 \right), \quad (5)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{w_q}{2} \cdot \frac{Xg(I)}{Xq(w_q)} = \frac{w_q \cdot Xg(I)}{2Q \cdot Rq}. \quad (6)$$

Решения уравнений (5) и (6) могут быть получены с помощью любого математического пакета, например Mathcad. Уравнение (5) определяет переходный процесс установления амплитуды, а уравнение (6) — переходный процесс установления частоты колебаний в резонаторе

К сожалению, стандартные программы не позволяют сделать это в одном цикле и разработчики вынуждены создавать либо свои специфические программы [17], либо использовать комбинацию существующих программ [13].

Для моделирования генераторов и других нелинейных радиочастотных систем (модуляторы, смесители и др.) удобно использовать метод

гармонического баланса [18, 19], предложенный Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым. В моделировании этот метод сначала использовался для СВЧ нелинейных устройств, а впоследствии стал применяться и для анализа автоколебательных систем [20, 21].

С нашей точки зрения, актуальным является комплексный подход к исследованию и разработке кварцевого генератора, в том числе термокомпенсированного КГ, в САПР, который позволяет быстро и максимально достоверно:

- исследовать процессы в схеме генератора на основе классических методик и подходов;
- исследовать полную схему автогенератора на схемотехническом уровне;
- исследовать зависимость точности термокомпенсации от параметров термокомпенсирующего устройства;
- анализировать влияние того или иного способа синтеза компенсирующей функции на уровень фазового шума;
- выполнять оптимизацию схемы генератора с акцентов на необходимый параметр или ряд параметров генератора.

Методология. Целью статьи — предложить новую методологию исследования работы автогенератора. Предлагаемая методология моделирования основана на использовании метода гармонического баланса в САПР Keysight ADS, которая является одним из мировых лидеров среди САПР телекоммуникационных систем и устройств и метода двухполюсного представления генератора.

Порядок моделирования и разработки термокомпенсированного кварцевого генератора включает в себя действия: 1) исследование импедансов активной и пассивной частей автогенератора (схемы возбуждения); 2) исследование температурно-частотной характеристики кварцевого резонатора (КР) на основе данных спецификации; 3) исследование импеданса пассивной части в диапазоне температур; 4) формирование требований к управляющему напряжению для управления частотой КР.

Моделирование и разработка термокомпенсированного кварцевого генератора

1. Исследование импедансов активной и пассивной частей автогенератора.

Генератор удобно рассматривать в виде параллельного соединения двухполюсников: активного двухполюсника (входное сопротивление является отрицательным (активным) и емкостным ($-R_{act}$ и X_{act})) и пассивного двухполюсника (входное сопротивление имеет характер сопротивления потерь и индуктивности) [12, 16]. Условием самовозбуждения является превышение величины отрицательного сопротивления активного двухполюсника над величиной сопротивления потерь в пассивном двухполюснике, причем генерирование колебаний осуществимо только на частоте, где равны и комплексно сопряжены реактивные части входного сопротивления активного и пассивного двухполюсников. С увеличением амплитуды генерируемых колебаний происходит ее дальнейшее ограничение и, как следствие, — уменьшение значения эффективного отрицательного сопротивления активного двухполюсника до значения, при котором величины отрицательного сопротивления активного двухполюсника и сопротивления потерь пассивного двухполюсника становятся равны: $|R_{act}| = |R_{pas}|$, $X_{act} = -X_{pas}$ (рис. 1).

В качестве примера этапы проектирования термокомпенсированного кварцевого генератора выполняются с использованием КР NX2520SG с номинальной частотой 26 МГц [22]. Активная часть автогенератора выполнена на биполярном транзисторе по схеме емкостной трехточки (рис. 2), где компоненты источника шума SRC16 и OscPort используются для моделирования характеристики фазового шума и исследования кольца автогенератора соответственно. На полевом п-канальном транзисторе J310 реализован буферный каскад.

Импеданс активной части генератора (рис. 2) при изменении уровня возбуждения при частоте сигнала $f = 26$ МГц показан на рис. 3. Заштрихованной областью на рис. 3 отмечен диапазон возможных значений реактивной (а) и активной (б)

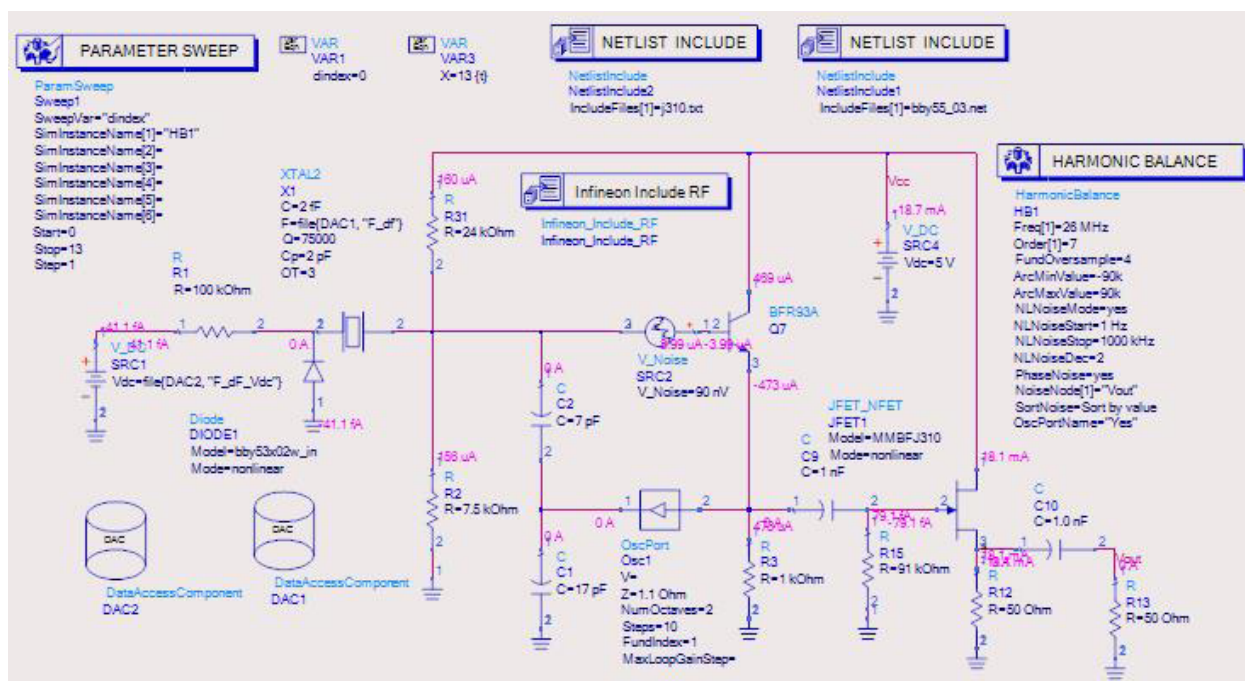


Рис. 2. Схема генератора

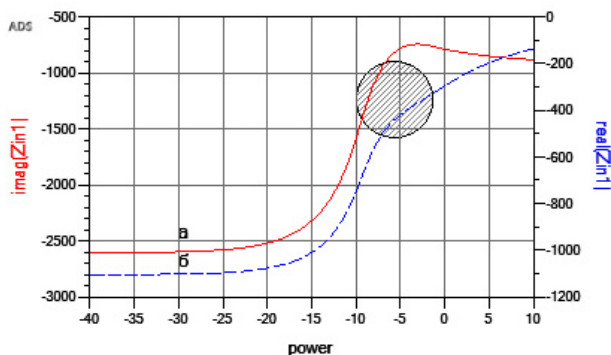


Рис. 3. Реактивная (а) и активная (б) части импеданса схемы возбуждения при изменении уровня

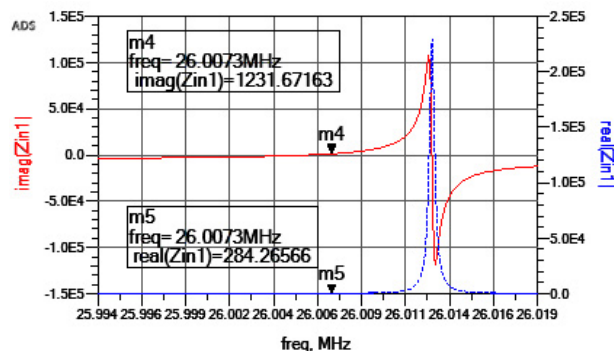


Рис. 4. Реактивная (m4) и активная (m5) части импеданса пассивной части

8	Temperature coefficient						
8-1	Inflection point	-	29	30.5	32	°C	
8-2	To	-		30.5	-	°C	
8-3	Third-order curve fitting coefficient	-	8.5	-	11.5	$\times 10^{-5}$ ppm/°C ³	The curve can be modeled as a third-order polynomial. $f(t) = c_3(t - t_0)^3 + c_2(t - t_0)^2 + c_1(t - t_0)$
8-4	Second-order curve fitting coefficient	-	-4.5	-	+4.5	$\times 10^{-4}$ ppm/°C ²	
8-5	First-order curve fitting coefficient	-	-0.4	-	-0.1	ppm/°C	

Рис. 5. Фрагмент спецификации на резонатор NX2520SG [22]

Tx	F_dfl	dF_ppm
-40.0	25999969.0	-31.0
-30.0	25999982.2	-17.8
-20.0	25999991.4	-8.6
-10.0	25999997.1	-2.9
0.0	26000000.2	0.2
10.0	26000001.2	1.2
20.0	26000001.0	1.0
30.0	26000000.1	0.1
40.0	25999999.2	-0.8
50.0	25999999.1	-0.9
60.0	26000000.4	0.4
70.0	26000003.8	3.8
80.0	26000010.1	10.1
85.0	26000014.5	14.5

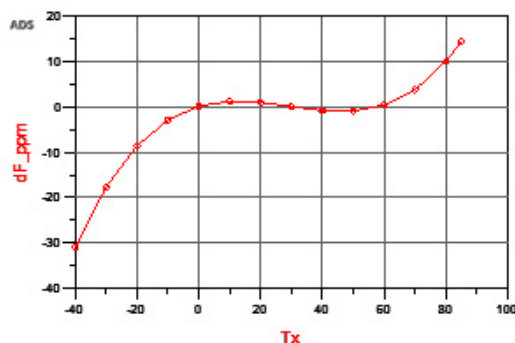


Рис. 6. Температурно-частотная характеристика КР NX2520SG при аппроксимации полиномом 3-ей степени на основе данных спецификации

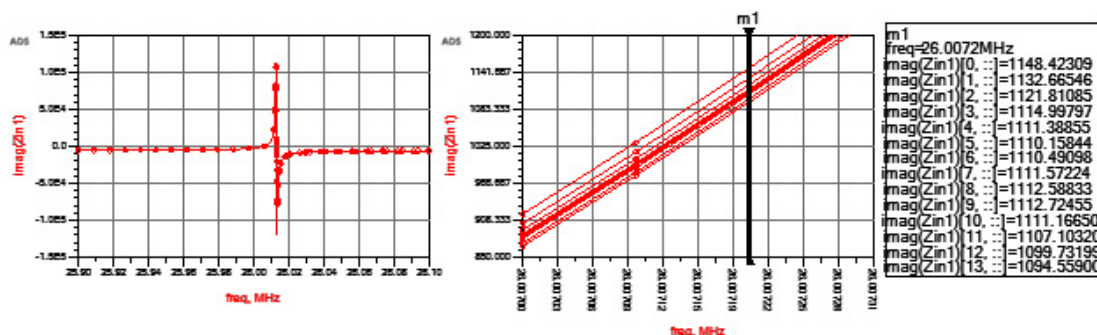


Рис. 7. Реактивная часть импеданса пассивной части

части импеданса схемы возбуждения генератора в зоне увеличения и ограничения амплитуды генерируемых колебаний. На рис. 4 показаны зависимость реактивной и активной частей импеданса пассивной части от частоты. Данные зависимостей на рис. 3, 4 показывают, что, в соответствии с моделью двухплюсного автогенератора, частота генерации должна быть в окрестности частоты 26,0073 МГц.

2. Исследование температурно-частотной характеристики кварцевого резонатора (КР) на основе данных спецификации.

Известно, что температурно-частотная характеристика кристалла кварца может быть аппроксимирована полиномом 3-ей степени [1, 22]:

$$\Delta f(T) = c_3 \cdot (T - T_0)^3 + c_2 \cdot (T - T_0)^2 + c_1 \cdot (T - T_0),$$

где Δf — стабильность частоты, c_1 , c_2 и c_3 — температурные коэффициенты, зависящие от угла среза, T_0 — температура точки перегиба, а T — фактическая температура.

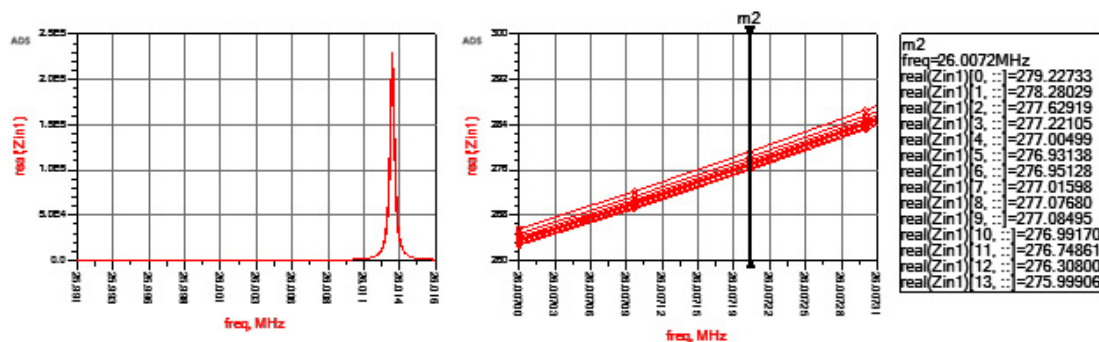


Рис. 8. Активная часть импеданса пассивной части

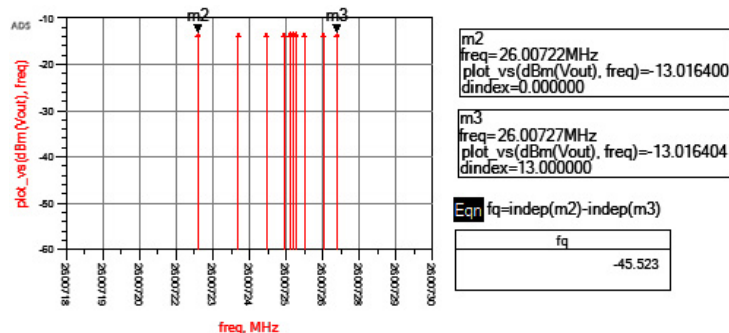


Рис. 9. Изменение частоты некомпенсированного КТ

На рис. 5 приведен фрагмент спецификации на КР NX2520SG [22] со сведениями о значениях температурно-частотных коэффициентов.

Изменение частоты для $f_0 = 26$ МГц в промышленном диапазоне температур от минус 40 до плюс 85 °С представлено на рис. 6.

Данные зависимости на рис. 6 показывают, что изменение частоты КР в диапазоне температур минус 40 плюс 85 °С составляет 45,5 ppm.

3. Исследование импеданса пассивной части в диапазоне температур.

Для исследования импеданса пассивной части в диапазоне температур используется схема на рис. 2.

Частота последовательного резонанса F исследуемого резонатора $X1$ задается с помощью компонента DAC1 (читаются значения F_dF1 на рис. 6), статическая емкость КР задана равной $C_p = 2$ пФ. Для изменения частоты F КР является варикап bby53x02w.

На рис. 7, 8 соответственно показаны изменения реактивной и активной частей импеданса КР в окрестности, которые соответствуют области значений реактивной и активной частей импеданса схемы возбуждения (рис. 2). На рис. 7, 8 индексы от 0 до 13 (в выражении $\text{imag}(Zin)$ и $\text{real}(Zin)$ для значений маркера m1, m2) соответствуют значениям температур от минус 40 до плюс 85 с шагом 10 °С (см. рис. 6)).

Данные зависимостей на рис. 7, 8 показывают, что, вследствие изменения температуры, пассивная часть автогенератора обеспечивает диапазон изменения значений, соответствующих области на рис. 3, и гарантирует условия генерирования автоколебаний.

4. Формирование требований к управляющему напряжению для управления частотой кварцевого генератора (КГ).

КГ с температурной компенсацией (ТККГ) состоит из датчика температуры, генератора компен-

сационного напряжения и кварцевого генератора, управляемого напряжением. Принцип работы ТСХО заключается в стабилизации изменения частоты кварцевых резонаторов в зависимости от изменения температуры окружающей среды.

Анализ литературы показал, что существует несколько причин, ограничивающих температурную стабильность частоты: 1) погрешности формирования компенсирующей функции, обусловленные структурой термокомпенсирующего устройства; 2) погрешности настройки системы компенсации, вызванные неточностью подбора элементов; 3) старение элементов системы компенсации. Кроме того, существует еще несколько малоизученных факторов ухудшения стабильности частоты, связанных с реакцией генератора на нестационарные тепловые воздействия: 1) гистерезис ТЧХ КР; 2) температурно-динамические искажения ТЧХ резонатора; 3) неоднородность пространственно-временного распределения теплового поля в объеме генератора. Термокомпенсирующее устройство на базе микроконтроллера позволяет реализовать синтез компенсирующей функции с учетом перечисленных факторов, в частности, табличным способом, когда в область памяти микроконтроллера заносятся экспериментально полученные коды цифроаналогового преобразователя (ЦАП) (задают управляющее напряжение) по адресам, определяемым по кодам аналого-цифрового преобразователя (АЦП), значения которых зависят от температуры.

Для формирования требований к управляющему напряжению для управления частотой кварцевого генератора была промоделирована схема КГ на основе ранее исследованных пассивной и активной частей автогенератора (рис. 2).

Точность температурной компенсации определяется точностью управления частотной характеристикой при воздействии дестабилизирующих факторов. Зависимость управляющего напряже-

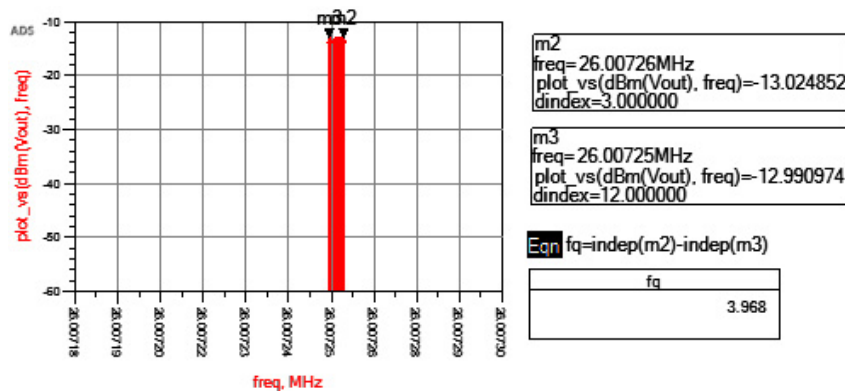


Рис. 10. Изменение частоты компенсированного КГ

ния от температуры для схемы на рис. 2 сформирована для условий: диапазон температур от -40 до $+85$ °C; в диапазоне температур взято 14 точек с шагом 10 °C; шаг управляющего напряжения (на выходе ЦАП) задан равным 10 мВ. На рис. 2 напряжение на выходе ЦАП смоделировано источником напряжения SRC1, который генерирует напряжение в соответствии с данными о температуре. В результате температурная стабильность повышена примерно с диапазона изменений $-31..+14,5$ ppm (рис. 9) до ± 2 ppm (рис. 10), то есть примерно в 11 раз при изменении управляющего напряжения (В) на варикапе в модели: 4.07, 4.04, 4.02, 4.01, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 3.99, 3.97, 3.96.

В рамках предложенного подхода данные параметры могут быть улучшены, например, за счет уменьшения температурного шага и минимального шага управляющего напряжения. Также качество температурной компенсации может быть улучшено при рассмотрении значений дифференциальной нелинейности преобразования, нелинейности преобразования, абсолютной погрешности преобразования конкретного ЦАП и параметров термодатчика.

Заключение. Предложенная методика проектирования термокомпенсированного кварцевого генератора, реализованная в САПР Keysight ADS, в отличие от методик, в основе которых лежит использование SPICE программ позволяет проводить комплексный анализ схем термокомпенсированных генераторов в части:

- определения реальной частоты генерации в конкретной схеме с учетом влияния параметров активной части схемы и конструкции на частоту;
- определения характеристики управления частотой генератора от управляющего напряжения с учетом нелинейности использованного варикапа и схемы его включения;
- определения диапазона перестройки частоты;
- влияния параметров резонатора на перестройку частоты;
- исследования шумовой характеристики генератора.

Можно считать, что **предложенная методика позволяет высчитывать частоту генерации реальной схемы с высокой точностью** (частота генерации практически никогда не равна частоте резонанса резонатора и цифре, написанной на корпусе резонатора), а также позволяет проводить оптимизацию схемы генератора по критериям удовлетворения требованиям технического задания. В целом предложенный метод позволяет ужесточить требования к показателям качества и уменьшить время разра-

ботки КГ по сравнению с численно-аналитическим подходом проектирования КГ.

Библиографический список

1. Frerking M. Crystal oscillator design and temperature compensation. New York: Van Nostrand, 1978. 241 p.
2. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. 2-е изд. Москва: Физматгиз, 1959. 916 с.
3. Евтянов С. И. Ламповые генераторы. Москва: Связь, 1967. 384 с.
4. Литвинов В. П. Инженерная методика анализа и расчета кварцевых генераторов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 171. С. 50–57.
5. Альтшуллер Г. Б. Кварцевая стабилизация частоты. Москва: Связь, 1974. 272 с.
6. Петров Б. Е., Романюк В. А. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Москва: Высшая школа, 1989. 232 с.
7. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей. Москва: Радио и связь, 1982. 280 с.
8. Макаренко В. Проблемы моделирования кварцевых генераторов в среде NI Multisim // Моделирование радиоэлектронных устройств. 2010. № 7. С. 43–49.
9. Малышев В. В., Никитин А. Б. Моделирование автогенераторов в системах автоматизированного проектирования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2016. № 1 (236). С. 15–22. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.2. EDN: VUUBFH.
10. Brendel R., Gillet D., Ratier N. [et al.]. Nonlinear dipolar modelling of quartz crystal oscillators. 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/228867063_Nonlinear_dipolar_modelling_of_quartz_crystal_oscillators (дата обращения: 15.05.2023).
11. Addouche M., Brendel R., Gillet D. [et al.]. Modeling of Quartz Crystal Oscillators by Using Nonlinear Dipolar Method // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2003. Vol. 50, no. 5. P. 487–495. DOI: 10.1109/TUFFC.2003.1201461.
12. Губарев А. А. Повышение эффективности моделирования кварцевых генераторов в схемотехнических САПР общего назначения // Омский научный вестник. 2003. № 2. С. 89–101.
13. Gubarev A. A., Kosykh A. V., Zavjalov S. A. [et al.]. SPICE simulation of high-Q crystal oscillators: single and dual-mode oscillator analysis // Proc. of the 2003 joint meeting IEEE IFCS and 17th EFTF. 2003. P. 606–614. DOI: 10.1109/FREQ.2003.1275160.
14. Gehring M. Fast crystal-oscillator-simulation methodology. 2005. URL: https://designers-guide.org/forum/Attachments/GEHRING_-_Fast_Crystal-Oscillator-Simulation_Methodology.pdf (дата обращения: 02.01.2023).

15. Ratier N., Bruniaux M., Galliou S. [et al.]. A very high speed method to simulate quartz crystal oscillator // 19th European Frequency and Time Forum (EFTF). 2005. URL: https://www.researchgate.net/publication/29615543_A_Very_High_Speed_Method_to_Simulate_Quartz_Crystal_Oscillator (дата обращения: 02.01.2023).

16. Ляшук А. Н., Завьялов С. А. Генератор на поверхностных акустических волнах с широкой перестройкой по частоте // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 300–303. EDN: OPFKAF.

17. Addouche M., Ratier N., Gillet D. [et al.]. ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software // 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. 2001. P. 753–757. DOI: 10.1109/FREQ.2001.956375.

18. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Символические методы нелинейной механики в их приложениях к исследованию резонанса в электронном генераторе // Известия Российской академии наук. VII серия. Отделение математических и естественных наук. 1934. Вып. 1. С. 7–34.

19. Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н. Введение в нелинейную механику. Киев: Изд-во АН УССР, 1937. 364 с.

20. Rohde U. L. Harmonic Balance Method Handles Nonlinear Microwave CAD Problems // Microwave Journal. 1987. № 10. P. 203–210.

21. Горгадзе С. Ф., Максимов А. А. Теория гармонического баланса для схемотехнического проектирования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. С. 21–32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-21-32. EDN: NVPJJN.

22. Specification. URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_NDK-EXS00A-CS11019_C280829.pdf (дата обращения: 02.01.2023).

UDC 621.373.5.001.5

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-132-139

EDN: UJETYF

ЛЯШУК Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1635-6235

AuthorID (РИНЦ): 742615

ORCID: 0000-0002-6394-9390

ResearcherID: R-2812-2016.

Адрес для переписки: pribor78@mail.ru

КОСЫХ Анатолий Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2971-4057

AuthorID (SCOPUS): 6701547176

ORCID: 0000-0001-6705-4255

ResearcherID: G-5127-2013

Адрес для переписки: avkosykh@omgtu.ru

Для цитирования

Ляшук А. Н., Косых А. В. Проектирование термокомпенсированного кварцевого генератора в САПР Keysight ADS // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 132–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-132-139.

Статья поступила в редакцию 20.06.2023 г.

© А. Н. Ляшук, А. В. Косых

A. N. LYASHUK

A. V. KOSYKH

**Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia**

TEMPERATURE COMPENSATED CRYSTAL OSCILLATOR DESIGN IN KEYSIGHT ADS

The article proposes an all-embracing approach to designing a temperature compensated crystal oscillator in Keysight ADS CAD system, which allows: to investigate the conditions for the occurrence of self-oscillations in a given oscillator circuit; analyze the temperature-frequency characteristics of the resonator; form requirements for the frequency control function; simulate noise characteristics of the generator; optimize the circuit according to the given parameters. In contrast to the well-known numerical design of a thermally compensated crystal oscillator in SPICE programs with subsequent analysis of the results in a mathematical program, for example, Mathcad, the proposed method allows us to investigate the real shape of oscillations, the spectral purity of the output signal, take into account the nonlinear influence of the circuit and more subtle effects.

Keywords: crystal oscillator, resonator, thermal compensation, Keysight ADS CAD, Colpitts oscillator, SPICE program.

References

1. Frerking M. Crystal oscillator design and temperature compensation. New York: Van Nostrand, 1978. 241 p. (In Engl.).
2. Andronov A. A., Vitt A. A., Khaykin S. E. Teoriya kolebaniy [Vibration theory]. 2nd ed. Moscow, 1959. 916 p. (In Russ.).
3. Evtyanov S. I. Lampovyye generatory [Lamp generators]. Moscow, 1967. 384 p. (In Russ.).

4. Litvinov V. P. Inzhenernaya metodika analiza i rascheta kvartsevykh generatorov [Engineer technique of the quartz generator analysis and calculation] // Nauchnyy vestnik MGTU GA. *Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA)*. 2011, no. 171. P. 50–57. (In Russ.).
5. Altshuller G. B. Kvarsevaya stabilizatsiya chastoty [Frequency stabilisation by quartz]. Moscow, 1974. 272 p. (In Russ.).
6. Petrov B. E., Romanyuk V. A. Radiopere dayushchiye ustroystva na poluprovodnikovyykh priborakh [Radio transmitting devices on semiconductor devices]. Moscow, 1989. 232 p. (In Russ.).
7. Andreyev V. S. Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey [Theory of non-linear electrical circuits.]. Moscow, 1982. 280 p. (In Russ.).
8. Makarenko V. Problemy modelirovaniya kvartsevykh generatorov v srede NI Multisim [Quartz generator modelling problems in NI Multisim environment] // Modelirovaniye radioelektronnykh ustroystv. *Modelling of Radio Electronic Devices*. 2010. No. 7. P. 43–49. (In Russ.).
9. Malyshev V. V., Nikitin A. B. Modelirovaniye avtogeneratorov v sistemakh avtomatizirovannogo proyektirovaniya [An oscillator designing using cad simulation] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. *Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. Computing, Telecommunication and Control*. 2016. No. 1 (236). P. 15–22. DOI: 10.5862/JCSTCS.236.2. EDN: VUUBFH. (In Russ.).
10. Brendel R., Gillet D., Ratier N. [et al.]. Nonlinear dipolar modelling of quartz crystal oscillators. 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/228867063_Nonlinear_dipolar_modelling_of_quartz_crystal_oscillators (accessed: 15.05.2023). (In Engl.).
11. Addouche M., Brendel R., Gillet D. [et al.]. Modeling of Quartz Crystal Oscillators by Using Nonlinear Dipolar Method // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2003. Vol. 50, no. 5. P. 487–495. DOI: 10.1109/TUFFC.2003.1201461. (In Engl.).
12. Gubarev A. A. Povysheniye effektivnosti modelirovaniya kvartsevykh generatorov v skhemotekhnicheskikh SAPR obshchego naznacheniya [Increase of quartz oscillator modelling efficiency in general-purpose circuit CAD] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2003. No. 2. P. 89–101. (In Russ.).
13. Gubarev A. A., Kosykh A. V., Zavjalov S. A. [et al.]. SPICE simulation of high-Q crystal oscillators: single and dual-mode oscillator analysis // Proc. of the 2003 joint meeting IEEE IFCS and 17th EFTF. 2003. P. 606–614. DOI: 10.1109/FREQ.2003.1275160. (In Engl.).
14. Gehring M. Fast crystal-oscillator-simulation methodology. 2005. URL: https://designers-guide.org/forum/Attachments/GEHRING_-_Fast_Crystal-Oscillator-Simulation_Methodology.pdf (accessed: 02.01.2023). (In Engl.).
15. Ratier N., Bruniaux M., Galliou S. [et al.]. A very high speed method to simulate quartz crystal oscillator // 19th European Frequency and Time Forum (EFTF). 2005. URL: https://www.researchgate.net/publication/29615543_A_Very_High_Speed_Method_to_Simulate_Quartz_Crystal_Oscillator (accessed: 02.01.2023). (In Engl.).
16. Lyashuk A. N., Zavyalov S. A. Generator na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh s shirokoy perestroykoy po chastote [Surface acoustic wave generator with wide frequency tuning range] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2011. No. 3 (103). P. 300–303. EDN: OPFKAF. (In Russ.).
17. Addouche M., Ratier N., Gillet D. [et al.]. ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software // 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. 2001. P. 753–757. DOI: 10.1109/FREQ.2001.956375. (In Engl.).
18. Krylov N. M., Bogolyubov N. N. Simvolicheskiye metody nelineynoy mekhaniki v ikh prilozheniyakh k issledovaniyu rezonansa v elektronnom generatore [Symbolic methods of Nonlinear Mechanics in their application to the study of resonance in the electronic generator] // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. VII seriya. Otdeleniye matematicheskikh i estestvennykh nauk. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series VII. Class of Mathematical and Natural Sciences*. 1934. Issue. 1. P. 7–34. (In Russ.).
19. Krylov N. M., Bogolyubov N. N. Vvedeniye v nelineynuyu mekhaniku [Introduction to non-linear mechanics]. Kiev, 1937. 364 p. (In Russ.).
20. Rohde U. L. Harmonic Balance Method Handles Nonlinear Microwave CAD Problems // Microwave Journal. 1987. No. 10. P. 203–210. (In Engl.).
21. Gorgadze S. F., Maksimov A. A. Teoriya garmonicheskogo balansa dlya skhemotekhnicheskogo proyektirovaniya [Harmonic balance theory for scheme technical design] // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2020. Vol. 14. P. 21–32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-21-32. EDN: NVPJJN. (In Russ.).
22. Specification URL: https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1912111437_NDK-EXS00A-CS11019_C280829.pdf (accessed: 02.01.2023) (In Russ.).

LYASHUK Aleksey Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
 SPIN-code: 1635-6235
 AuthorID (RSCI): 742615
 ORCID: 0000-0002-6394-9390
 ResearcherID: R-2812-2016
 Correspondence address: pribor78@mail.ru
KOSYKH Anatoliy Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of Radio Engineering Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.
 SPIN-code: 2971-4057
 AuthorID (SCOPUS): 6701547176
 ORCID: 0000-0001-6705-4255
 ResearcherID: G-5127-2013
 Correspondence address: avkosykh@omgtu.ru

For citations

Lyashuk A. N., Kosykh A. V. Temperature compensated crystal oscillator design in Keysight ADS // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 132–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-132-139.

Received June 20, 2023.

© A. N. Lyashuk, A. V. Kosykh



МОСТОВОЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В настоящей работе решается прикладная задача проектирования мостового резонансного преобразователя с системой высоковольтного зажигания дуги в канале электродугового двигателя. Представлена разработка мостового резонансного источника питания, проведен обзор и анализ источников питания дуговых двигателей различной мощности.

Рассмотрены теоретические аспекты расчета основных параметров источника. Приведена передаточная функция, описывающая коэффициент усиления резонансного контура источника питания. С помощью передаточной функции построены диаграммы усиления при разных значениях добротности контура. Представлен опытный образец источника питания, системы запуска и электродугового двигателя. Проведена серия экспериментов, направленных на выявление работоспособности источника.

По результатам экспериментов максимальная выходная мощность источника составила 182,4 Ватта, а максимальная эффективность — 87,5 %. Получены частотные спектры выходного тока источника питания. Построены вольтамперные характеристики для рабочего тела Ar и N₂.

В процессе исследования обнаружены явления связанные с хаотической динамикой дуги в канале двигателя. Хаотические колебания наблюдались в момент запуска двигателя и исчезали после установившегося режима работы.

Ключевые слова: резонансный преобразователь, электродуговой микродвигатель, малый космический аппарат, низкоорбитальная группировка, термодатика.

Введение. В настоящее время развитие космических аппаратов направлено на увеличение срока активного существования, оптимизации массы полезной нагрузки и повышение надежности. Малые космические аппараты являются одним из перспективных направлений космической деятельности. В последнее время все чаще используются как средство исследования природных ресурсов и объектов земной поверхности. Они широко применяются для организации систем связи, навигации, телевидения, изучения погодных условий и природных ресурсов Земли, предоставления интернет-услуг, а также освоения и изучения дальнего космоса [1]. Особенно круг решаемых задач расширяется, если у космического аппарата появляется возможность маневрирования, но для этого необходимо в состав космического аппарата вводить двигательную установку, обеспечивающую аппарат необходимыми импульсами тяги.

Таким образом, становится актуальной разработка источников питания двигателей космических

аппаратов мощностью до 300 Вт и массой не более 100 кг, которые могут работать в течение длительного периода времени. Кроме того, дальнейшее снижение потребляемой мощности также является актуальной задачей, но для этого необходимо снижать массу источника питания и увеличивать его эффективность. Это возможно только за счет более эффективного распределения энергии внутри источника или, например, применяя более совершенную топологию силовой части и системы управления. Электродуговые двигатели имеют ряд особенностей, связанных с генерацией плазменной струи, которые могут приводить к хаотическому режиму работы и требуют особого подхода к управлению. Плазменная струя образуется в результате прохождения электрического тока через газовую среду, что приводит к ионизации газа и образованию плазмы. В электродуговых двигателях эта струя используется для создания тяги путем выброса газов из сопла. Одним из основных факторов, влияющих на характеристики плазменной струи, является

сила тока, проходящего через электродугу. При недостаточном токе струя может быть неустойчивой и непредсказуемой, что снижает эффективность двигателя. С другой стороны, при слишком большом токе возможно повреждение двигателя. Таким образом, для стабилизации работы электродугового двигателя необходимо вводить цепи обратной связи по току и напряжению.

Активные исследования в области построения источников питания дуговых двигателей начаты около 50 лет назад. За прошедшее время изучено и разработано достаточно много типов источников питания, способных обеспечивать широкий диапазон выходной мощности.

В электродуговых двигателях с тепловым ускорением получение тяги происходит за счет превращения в сопле потенциальной энергии газа в кинетическую. Энергия истекающего газа определяется его температурой перед критическим сечением сопла [2]. Нагрев рабочего тела осуществляется за счет пропускания его через электрическую дугу. В этом случае температура газа может значительно превышать температуру электродов двигателя и, следовательно, удельный импульс тяги будет являться значительным преимуществом. В зависимости от использованного рабочего тела удельный импульс тяги может достигать до 550 с для гидразина и до 1500 с для водорода.

В работе [3] рассмотрены особенности проектирования источника питания электродуговых и плазменных двигательных установок, используемых для коррекции орбиты малых космических аппаратов. Показана возможность увеличения удельной мощности данных систем с помощью совмещения функций нескольких преобразователей электрической энергии, работающих последовательно. Приведены функциональная схема устройства, построенного на базе совмещенного преобразователя, его основные параметры и показан внешний вид.

В следующих работах приведены результаты зарубежных экспериментальных исследований. В работе [4] показан источник питания для водородных дуговых двигателей. Описывается проектирование, результаты испытаний, разработка схемы источника мощностью 10 кВт. Силовая часть реализована с помощью мостовой схемы, которая аналогична той, что используется в современных мощных преобразователях. Фильтрация выходного тока осуществлялась с помощью дросселя с интегрированной обмоткой генерации высоковольтных импульсов, необходимых для зажигания дуги.

Регулирование и стабилизация тока дуги выполнены с использованием фазовой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Низкая индуктивность обмоток силового трансформатора позволила минимизировать динамические потери. Для минимизации потерь проводимости использовались полупроводниковые полевые транзисторы. Потери на переключение были сведены к минимуму с помощью быстродействующей, оптической изолирующей схемы. Входное напряжение питания для устройства составляло 150 В, а максимальное выходное напряжение — 225 В при частоте коммутации 20 кГц. Эффективность источника питания составила 94 %.

В работе были продемонстрированы надежные запуски двигателя и переходы к установившемуся режиму работы. Расчетная удельная масса для полетного агрегата составляла 2 кг/кВт.

В работе [5] описан источник дугового двигателя мощностью 1 кВт. Конструкция содержит ШИМ преобразователь, который имеет замкнутый контур для обеспечения быстрого регулирования тока. Представлены экспериментальные данные эффективности, отклика регулирования системы управления и пульсации выходного напряжения и тока. Испытания показали, что разработанный источник питания способен запускать дугу в двигателе менее чем за секунду и при этом не разрушать электроды.

Система управления источника питания построена на ШИМ-контроллере UC1846. Микросхема UC1846 содержит источник опорного напряжения, усилитель ошибок, генератор, ограничитель импульсного тока. ШИМ-контроллер управляет парой силовых транзисторов. Транзисторы защищены от бросков напряжения с помощью снабберов и стабилизаторов.

В работе [6] разработан источник питания дугового двигателя мощностью 1,8 кВт, работающий на частоте 33 кГц. Представлены структура и основные электрические характеристики. Особое внимание уделено пусковому блоку и преобразователю. Также описана система управления источника. Система управления разделена на два основных блока: аналоговый и цифровой. Описана методика управления запуском двигателя. После проведенных испытаний представлены характеристики и параметры разработанного устройства.

Также становятся популярны многофазные резонансные источники питания. Мощность источников составляет 4 кВт при входном напряжении 80-160 В. Выходное напряжение до 200 В. Эффективность источников около 96 %. Для резонансных преобразователей законы управления более сложны, чем для преобразователей, основанных на ШИМ-контроллерах. Еще один недостаток резонансных источников — это большие потери холостого хода относительно преобразователей, основанных на ШИМ-контроллерах. Однако они имеют низкие входные пульсации тока, что позволяет использовать небольшую величину емкости конденсаторов на шине питания, обладают низким уровнем электромагнитного излучения и имеют высокую эффективность. Поэтому в настоящее время перспективным направлением является разработка и исследование многофазных и однофазных резонансных преобразователей. Многофазные резонансные преобразователи используются для питания двигателей мощностью более 1 кВт, что является избыточным для малых космических аппаратов с мощностью источника не более 300 Вт, но при этом источник питания должен иметь минимальный вес и максимальную надежность.

Теория. Рассмотрим теоретический аспект работы преобразователя и приведем расчет основных параметров, необходимых для проектирования источника питания с применением резонансной технологии [7]. Особенность данной технологии заключается в том, что переключение силовых транзисторов происходит либо когда ток в резонансном контуре переходит через нулевое значение, либо когда напряжение на резонансном контуре близко к нулю. Это позволяет уменьшить потери на переключение и увеличить эффективность.

Составим общую схему преобразователя, схему замещения и структурную схему. Упрощенная схема резонансного источника питания показана на рис. 1. Она состоит из инвертора, построенного на МОП-транзисторах (VT1-VT4), резонансной

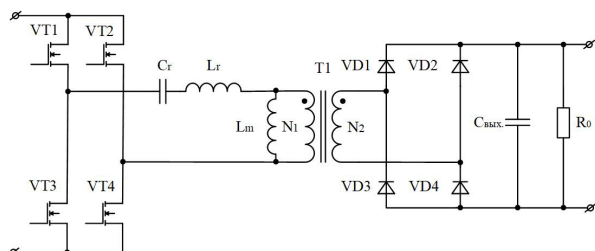


Рис. 1. Обобщенная схема резонансного преобразователя

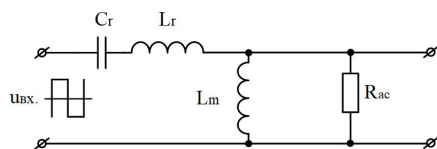


Рис. 2. Схема замещения резонансной цепи преобразователя

емкости C_r и индуктивности L_r силового трансформатора T1 и мостового выпрямителя (VD1-VD4). С выхода инвертора формируется переменное напряжение прямоугольной формы, которое поступает на резонансный контур, образованный конденсатором, первичной обмоткой трансформатора и индуктивностью L_r .

Построим схему замещения резонансной цепи преобразователя и определим коэффициент усиления (рис. 2).

Коэффициент усиления для представленной схемы определяется по выражению

$$K = K_s \cdot K_r \cdot K_T \quad (1)$$

где K_s — коэффициент преобразования схемы инвертора, K_r — коэффициент усиления резонансного контура, K_T — коэффициент преобразования силового трансформатора.

Коэффициент преобразования для мостовой схемы инвертора равен 1. Полумостовая схема имеет коэффициент $K_s = 1/2$. Для эквивалентной схемы усиление резонансного контура определяется с помощью функции

$$K_r(Q, m, F_x) = \frac{F_x^2(m-1)}{\sqrt{(m \cdot F_x - 1)^2 + F_x^2(F_x^2 - 1)^2 \cdot (m-1)^2 \cdot Q^2}} \quad (2)$$

Функция принимает три аргумента: Q — добротность резонансного контура; $F_x = \frac{f_k}{f_r}$ — нормализованную частоту, где f_k — частота коммутации силовых ключей, f_r — резонансная частота контура; параметр m , определяющий отношение общей индуктивности первичной обмотки трансформатора к индуктивности резонансного контура.

Аргументы функции рассчитываются с помощью следующих выражений:

$$Q = \frac{\sqrt{L_r}}{R_{ac}}, \quad (3)$$

где L_r — индуктивность резонансного контура, C_r — емкость резонансного контура, R_{ac} — эквивалентное сопротивление нагрузки на переменном токе.

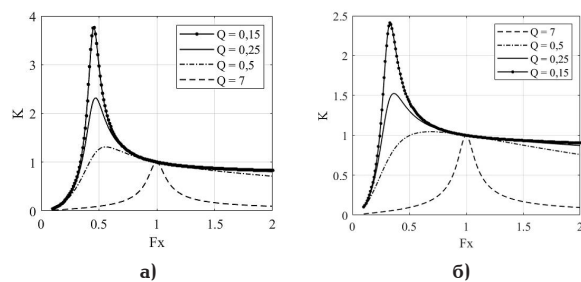


Рис. 3. Диаграммы коэффициента усиления для разных значений добротности резонансного контура при постоянном параметре $m = 5$ (а) и влияние параметра m на усиление резонансного контура: б — величина $m = 10$; в — величина $m = 20$

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot R_0, \quad (4)$$

где N_1 — число витков первичной обмотки силового трансформатора, N_2 — число витков вторичной обмотки силового трансформатора, R_0 — сопротивление нагрузки.

$$m = \frac{L_r + L_m}{L_r}, \quad (5)$$

где L_m — индуктивность намагничивания первичной обмотки трансформатора.

Резонансная частота контура равна

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \cdot C_r}}. \quad (6)$$

С помощью передаточной функции (2) построим диаграммы коэффициента усиления. Проведем анализ влияния добротности контура на величину усиления, а также рассмотрим влияние параметра m (рис. 3).

Из рис. 3а видно, что кривые, построенные для уменьшающихся величин добротности, соответствуют работе преобразователя при снижении нагрузки в выходной цепи. Увеличение величины Q соответствует возрастанию нагрузки в выходной цепи. Коэффициент усиления $K = 1$ на резонансной частоте $F_x = 1$, когда $f_k = f_r$. Также видно, что все диаграммы пересекаются в точке резонансной частоты $F_x = 1$.

Пиковые значения полученных диаграмм коэффициента усиления определяют границу между индуктивным и емкостным сопротивлением резонансного контура. Таким образом, появляется возможность определить области работы схемы инвертора преобразователя на индуктивную или емкостную составляющую. Область емкостной со-

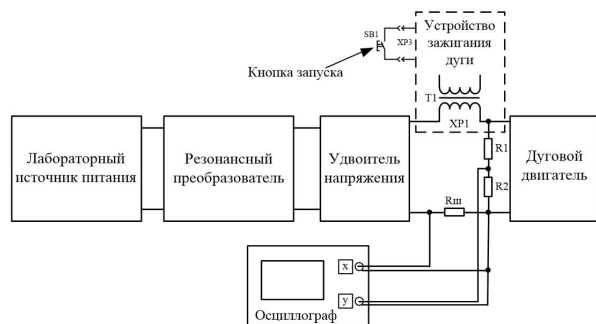


Рис. 4. Структурная схема

ставляющей находится слева от экстремума функции, а индуктивной — справа. Работа на емкостную составляющую контура дает возможность переключения силовых транзисторов инвертора переключаться в момент нулевого значения протекающего тока. Работа на индуктивную составляющую позволяет производить переключения в момент нулевого значения напряжения на резонансном контуре [8].

Представленные на рис. 3б и 3в диаграммы коэффициента усиления, полученные для разных значений m , показывают, что более низкие значения величины m обеспечивают более высокий коэффициент усиления. Однако при одинаковой величине добротности Q и резонансной частоте f_p это приводит к уменьшению индуктивности намагничивания L_m силового трансформатора, что, в свою очередь, приводит к увеличению мгновенного значения тока в первичной обмотке. Слишком низкое значение m увеличивает статические потери. Следова-

но, проектирование источника необходимо начать с выбора оптимального значения m , при котором достигается требуемое усиление преобразователя. В процессе проектирования важно установить значение добротности Q и величину параметра m .

Структурная схема. Общее понимание принципа работы установки изображено на структурной схеме (рис. 4). В качестве нагрузки источника питания используется дуговой двигатель. Регистрация выходного напряжения и тока производится осциллографом.

В схеме кнопка SB1 включает устройство зажигания дуги, что приводит к запуску дугового двигателя. После нажатия кнопки формируются импульсы высокого напряжения амплитудой 10,1 кВ и частотой следования $f_{ca} = 850$ Гц.

Разработка принципиальной схемы источника и цепи зажигания дуги. Источник питания построен на микросхеме FAN762. Данная микросхема является контроллером частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и предназначена для проектирования полумостовых резонансных преобразователей. Источник включает в себя высоковольтную систему зажигания дуги, собранную на отдельной плате с применением микроконтроллера.

Принципиальная схема источника приведена на рис. 5.

Схема включает в себя инвертор, собранный на МОП-транзисторах, трансформатор, мостовой выпрямитель, цепь обратной связи по напряжению, цепь обратной связи по току, ЧИМ-контроллер и подключенные к нему драйверы.

Инвертор, выполненный на транзисторах VT7-VT10, образует мостовую схему [10].

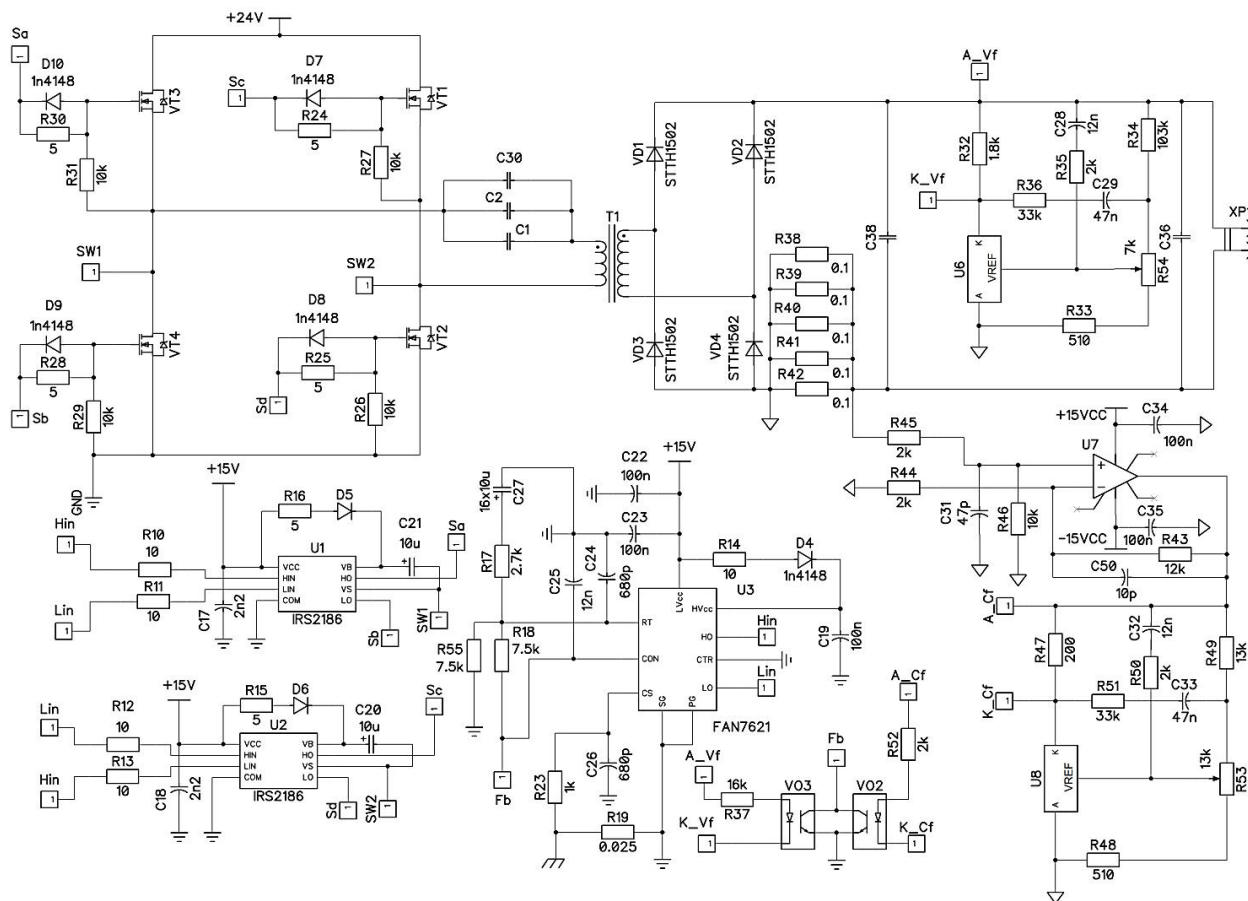


Рис. 5. Схема преобразователя

Цепи обратной связи реализованы на микросхеме TL431. Сигнал обратной связи по напряжению поступает с зажимов K_Vf и A_Vf на оптрон VO3, который подключен к выводу контроллера управления. Резисторы R38-R42 образуют токовый шунт для цепи обратной связи по току. Токковая обратная связь является основополагающей в данном устройстве, поскольку с помощью нее обеспечивается крутопадающая характеристика источника питания, что позволяет получить дуговой разряд в полости электродугового двигателя. На представленной схеме сигнал тока, поступающий с шунта, усиливается неинвертирующим усилителем U7.

Сопротивлением R45 и емкостью C31 образован фильтр нижних частот (ФНЧ). Расчёт коэффициента передачи фильтра по напряжению производился по выражению

$$K_U(f) = \frac{X_C(f)}{\sqrt{R_{39}^2 + X_C(f)^2}}, \quad (7)$$

где $X_C(f) = \frac{1}{2\pi f C_{32}}$ — сопротивление емкости на частоте f . Частота среза, на которой $K_U = 1/\sqrt{2}$ (или -3дБ) относительно нулевой частоты вычислялась по выражению

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{39} C}. \quad (8)$$

Выходная цепь неинвертирующего усилителя подключена к усилителю ошибки, собранному аналогично схеме цепи обратной связи по напряжению. Сигналы K_Cf и A_Cf поступают на оптопару VO2, включенную в цепь ЧИМ-контроллера. Таким

образом, и обратная связь по току, и обратная связь по напряжению имеют гальваническую развязку.

Так как микросхема предназначена для проектирования полумостовых преобразователей, была разработана схема расширения на драйверах верхнего и нижнего плеча, которая позволила реализовать управление мостовым инвертором. В схеме входные сигналы L_{in} и H_{in} поступают на входы драйверов от ЧИМ-контроллера. Выходные сигналы схемы S_a , S_b , S_c и S_d подаются на затворы МОП-транзисторов VT7-VT10 инвертора. Для увеличения скорости закрытия транзистора в цепь их затворов включены диоды D7-D10 параллельно резисторам. Чтобы высоковольтная и силовая часть источника имела гальваническую развязку с системой управления, создан дополнительный источник питания мощностью 5 Вт с выходным напряжением ± 15 В. Источник необходим для питания цепи обратной связи по току [11]. На рис. 6 приведена принципиальная схема данного источника.

Питание логической части микросхемы, а также драйверов и ЧИМ-контроллера осуществляется параметрическим стабилизатором, который собран на транзисторе VT6, стабилитроне D3 и резисторе R2. Входное напряжение стабилизатора может изменяться в пределах от 18 В до 33 В, при этом выходное напряжение будет составлять 15 В.

Устройство зажигания дуги выполнено на отдельной печатной плате. Принципиальная схема устройства показана на рис. 7.

Трансформатор T1 собран на тороидальном ферритовом сердечнике размером 50×30×19. Индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_{1p} = 11$ мкГн, индуктивность вторичной обмотки $L_{2s} = 6,31$ мГн. Для получения импульса высокого напряжения на выходе устройства зажигания необходимо сформировать короткие импульсы

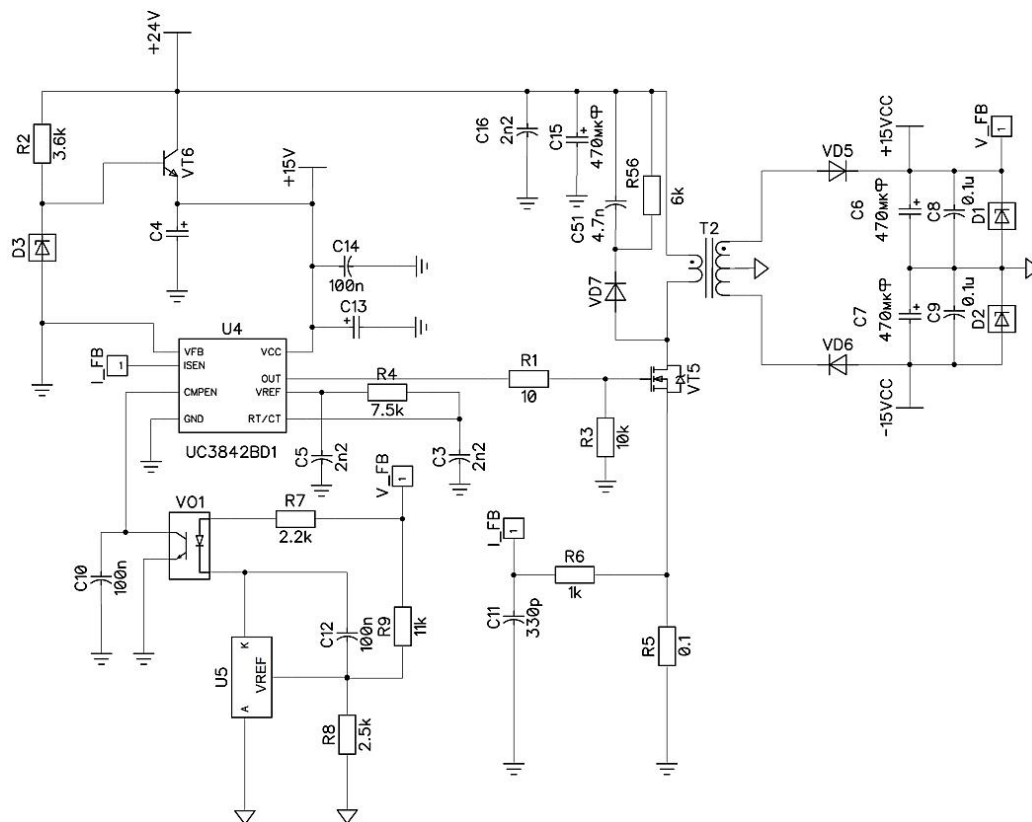


Рис. 6. Схема дополнительного источника питания

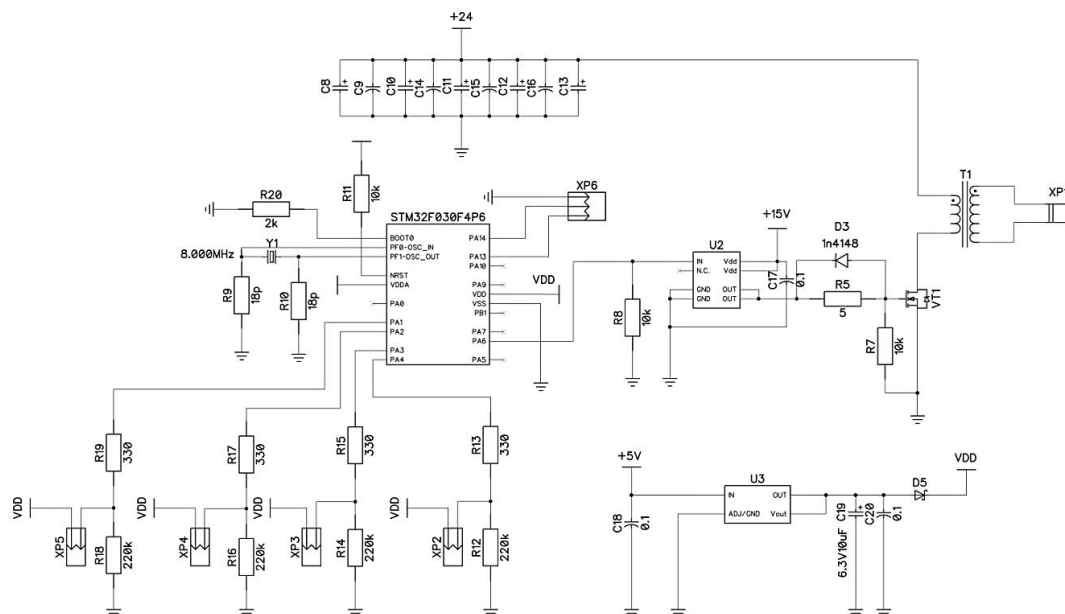


Рис. 7. Принципиальная схема устройства зажигания дуги

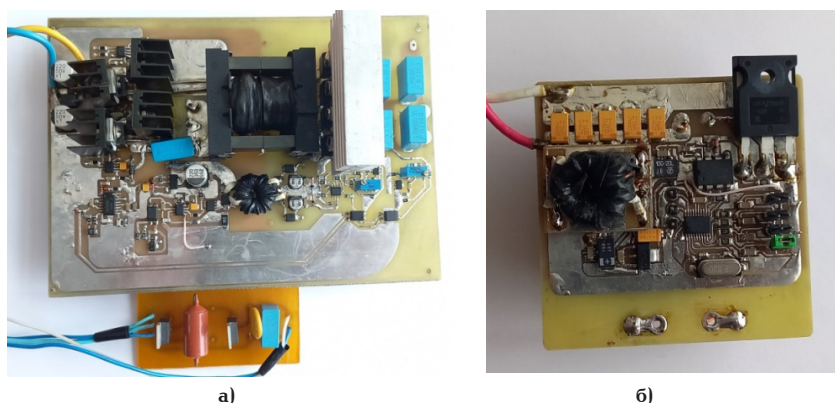


Рис. 8. Источник питания и удвоитель напряжения (а); устройство зажигания дуги (б)

в первичной обмотке трансформатора с высокой скоростью нарастания и спада. Формирование таких импульсов реализовано на микроконтроллере. Усиление и согласование импульсов обеспечивается драйвером, рассчитанным на большой выходной ток. Выход драйвера подключается к затвору транзистора VT1. Транзисторы в таких схемах следует выбирать с высоким напряжением сток-исток (более 500 В) и низким сопротивлением канала в открытом состоянии (менее 0,5 Ом). Еще необходимо уделить внимание величине скорости открытия и закрытия транзистора и затворной емкости. Цепь управления затвором транзистора должна иметь большее быстродействие, чем выбранный транзистор. В представленной схеме высоковольтный импульс формируется в момент закрытия транзистора. Разъемы XP2-XP5 служат для установки частоты следования импульсов (850 Гц, 1000 Гц, 1500 Гц и хаотическая частота).

Экспериментальные исследования. В ходе проведения экспериментов было установлено, что величина выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 68$ В недостаточна для устойчивого и надежного зажигания дугового промежутка, поэтому в схему был добавлен блок удвоения напряжения. С помощью уд-

воителя удалось повысить выходное напряжение до 140 В, не прибегая к изменению числа витков вторичной обмотки силового трансформатора.

Фотография источника питания и устройства зажигания дуги представлена на рис. 8.

Печатные платы выполнены на двухстороннем текстолите. Размеры платы источника питания 180 мм×130 мм×90 мм. Размеры устройства зажигания дуги 67 мм×67 мм×50 мм.

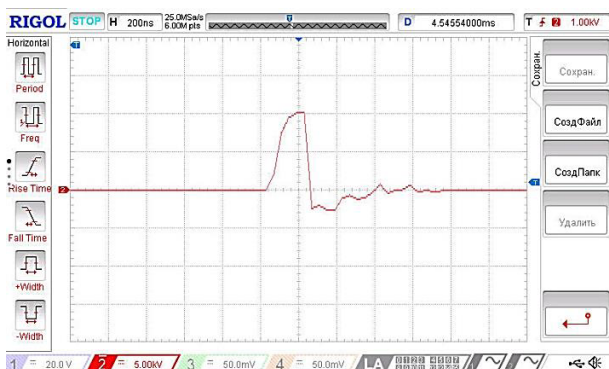
Серия испытаний включает в себя 3 эксперимента, которые направлены на выявление мощностных характеристик, проверки работы цепей обратных связей, эффективности, проверки работы цепи зажигания. В заключительной части проведено испытание на совместную работу источника с электродуговым двигателем.

Эксперимент № 1. В первой части эксперимента источник питания подключался к программируемой электронной нагрузке. Цель эксперимента: установить величину коэффициента полезного действия разработанного источника при разных значениях нагрузочного сопротивления и произвести проверку обратной связи по току.

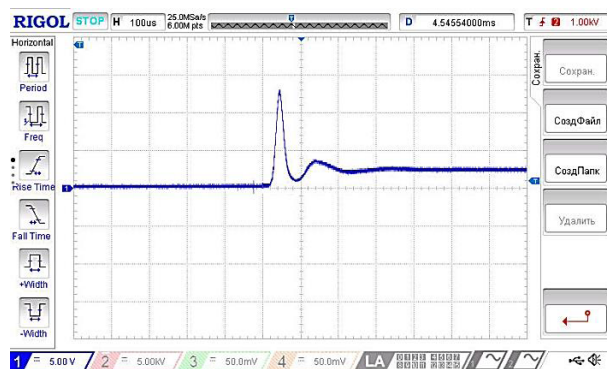
В процессе эксперимента сопротивление нагрузки на выходе источника питания изменялось

Результаты эксперимента на электронную нагрузку

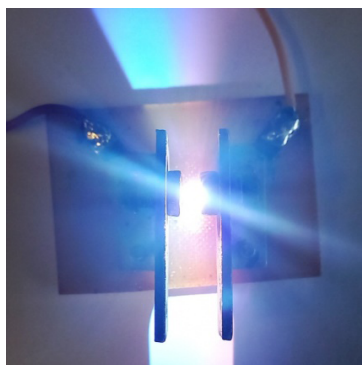
R_0 , Ом	$P_{\text{вых.}}$, Вт	$P_{\text{вх.}}$, Вт	$U_{\text{вх.}}$, В	$I_{\text{вх.}}$, А	$U_{\text{вых.}}$, В	$I_{\text{вых.}}$, А	η , %
10	155,78	178,06	30,7	5,8	39,44	3,95	87,487
8	147,7	178,64	30,8	5,8	34,43	4,29	82,68
6	130,48	173,04	30,9	5,6	27,94	4,67	75,4
4	98,8	156	31,2	5	19,88	4,97	63,33
3,5	89,3	149,76	31,2	4,8	17,69	5,05	59,62



а)



б)



в)

Рис. 9. Процесс запуска дугового разряда: а) импульс напряжения, инициирующий разряд; б) форма выходного тока в момент зажигания разряда; в) фотография процесса горения дуги

от 3,5 до 10 Ом. Результаты, полученные в ходе эксперимента, приведены в табл. 1.

Эксперимент проходил следующим образом. После подключения нагрузки величиной 3,5 Ом значение выходного тока стабилизировалось на уровне $I_{\text{вых.}} = 5$ А. Далее сопротивление нагрузки ступенчато увеличивали. Из табл. 1 видно, что стабилизация тока хорошо работает при низком сопротивлении нагрузки. Подключение нагрузки $R_0 = 10$ Ом привело к рассогласованию установленной и полученной величины тока. Величина рассогласования составила 22 %. Проанализировав таблицу, можно увидеть, что рост выходной мощности приводит к увеличению эффективности. Данная особенность связана с тем, что в режиме стабилизации тока ЧИМ-контроллер увеличивает частоту коммутации при уменьшении сопротивления нагрузки. Высокая частота коммутации приводит к росту динамических потерь в преобразователе и уменьшает его эффективность. Таким образом, регулирование и стабилизация выходного тока приводит к вышеописанным последствиям.

Эксперимент № 2. Эксперимент проводился при атмосферном давлении. В качестве имитации дугового канала использовались два электрода, закрепленные на текстолитовой пластине. Длина разрядного промежутка составляла 1,3 мм. Величина выходного тока в цепи обратной связи устанавливалась минимальной. Зажигание дуги проводилось при частоте следования высоковольтных импульсов 850 Гц. Результаты испытания представлены на рис. 9.

Из осциллограммы (рис. 9а) видно, что амплитуда импульса на момент старта была 10,1 кВ. Длительность положительного значения импульса равна 224 нс. После запуска высоковольтные импульсы выключались.

Диаграмма тока получена с помощью низкогомного шунтирующего сопротивления величиной 0,5 Ома. Длительность переходного процесса составила 290 мкс. Пиковое значение выходного тока на момент запуска было равно 32 А. В установившемся режиме ток стабилизировался цепью обратной связи на уровне 4,6 А.

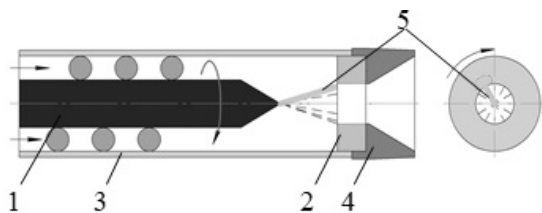


Рис. 10. Структура электродугового двигателя

Напряжение холостого хода составило 136,3 В и после появления дугового разряда уменьшалось до 18,6 В. Выходная мощность при минимальном токе составила 85,56 Вт, а входная мощность 174,42 Вт. Частота следования импульсов ЧИМ-модулятора достигала 260 кГц. На данной частоте источник выдавал минимальное значение выходной мощности.

Большое значение тока на момент запуска обусловлено выходными емкостями, суммарное значение которых составляет 1,5 мкФ. Осциллограммы тока и напряжения получены с помощью осциллографа «Rigol MSO 1104». Аппаратная и программная фильтрация сигналов не применялась.

Эксперимент № 3. Перед описанием результатов эксперимента рассмотрим конструкцию электродугового двигателя. На рис. 10 представлена структура электродугового двигателя.

Двигатель включает в себя: 1 — катод; 2 — анодную вставку; 3 — корпус; 4 — сопло; 5 — дуговой канал. Катод и анодная вставка были изготовлены из вольфрама, легированного диоксидом тория. Для создания корпуса и сопла двигателя применялась нержавеющая сталь. Корпус двигателя подключался к положительному полюсу источника питания, а электрод катода — к отрицательному.

Экспериментальные исследования проводились в вакуумной камере с полезным объемом 0,47 м³.

Начальное давление в камере без подачи рабочего тела составляло 10 Па. После подачи газа в полость двигателя давление в камере увеличивалось до 72 Па. Расход рабочего тела в процессе эксперимента изменялся от 0,4 кг/см² до 0,7 кг/см².

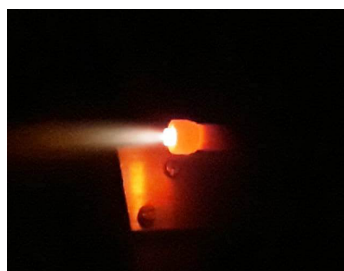
На рис. 11 представлены фотографии опытного образца двигателя и его работа в вакуумной камере. Работоспособность проверялась на двух типах рабочего тела (аргон (Ar) и азот (N₂)).

Наибольшее значение потребляемой двигателем мощности $P_{\text{вых.}} = 182,4$ Вт было достигнуто с помощью рабочего тела N₂. На аргоне, при одинаковых условиях, потребляемая мощность была равна $P_{\text{вых.}} = 130,4$ Вт. Установленный в цепи обратной связи выходной ток $I_{\text{вых.}} = 5$ А.

В процессе эксперимента при превышении предельной мощности 180 Вт, стенка двигателя и навинченная часть сопла прогорела через непродолжительное время работы (30–40 минут). Это связано с тем, что температура плазмы в канале двигателя сильно повышается [12]. Проплавленный участок корпуса в опытном образце электродугового двигателя показан на рис. 11б.

По результатам эксперимента построены вольт-амперные характеристики для вышеуказанных газов. Вольт-амперные характеристики имеют крутопадающий участок (рис. 12). Кривые получены при устойчивом и неустойчивом запуске двигателя.

Из рис. 12а и 12б видно, что рабочая точка испытывает флуктуации в процессе горения дуги. Такого рода явление может быть обусловлено несколькими причинами. Первой и самой очевидной прочной является «пляска» электрической дуги в канале между анодом и катодом. В таком случае сопротивление становится быстропеременным и величина этого сопротивления изменяется случайным образом. На каждое такое изменение должна реагировать введенная обратная связь, и если быстродействие обратной связи недостаточно, то появляются колебания в области рабочей точки. Второй причиной

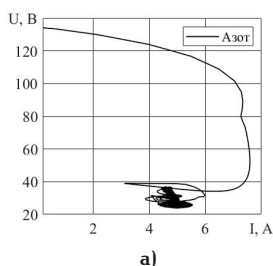


а)

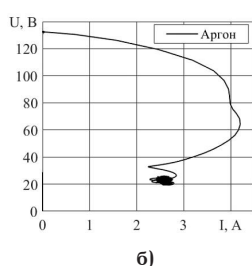


б)

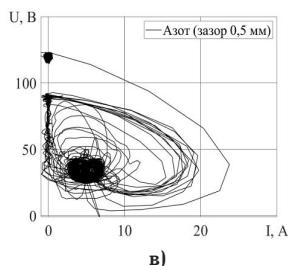
Рис. 11. Демонстрация работы на рабочем теле N₂ (а) и опытный образец дугового двигателя (б)



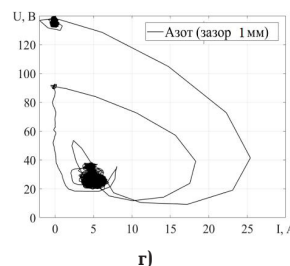
а)



б)



в)



г)

Рис. 12. Вольт-амперные характеристики, полученные в процессе устойчивого и неустойчивого запуска: а, б) устойчивый запуск; в, г) неустойчивый запуск

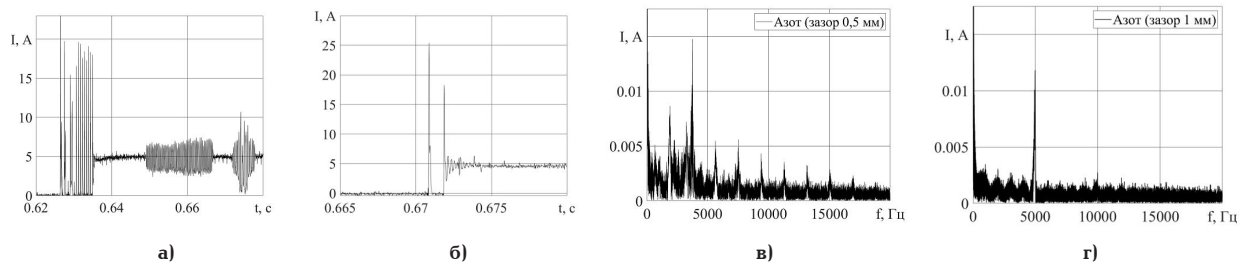


Рис. 13. Осциллограммы выходного тока в момент запуска (а, б) и частотные спектры для представленных токов (в, г)

могут служить термоакустические колебания и связанные с ними резонансные эффекты [13]. Совокупность явлений в конечном счете приводит к изменению проводимости плазменного канала и, как следствие, к изменению положения рабочей точки на вольтамперной характеристике.

Большой интерес вызывают вольтамперные характеристики, полученные для случая, когда процесс запуска был неустойчив и продолжался некоторое время (рис. 12в, г). Неустойчивые режимы возникали чаще всего на рабочем теле N_2 , поэтому вольтамперные характеристики приведены для данного типа газа.

Полученные экспериментальным путем рисунки по своей форме схожи со странным аттрактором [14]. Проанализировав рисунки, можно сделать вывод, что данные выходного напряжения и тока в каждый момент времени концентрируются в одной точке фазового пространства, которая и представляет собой систему в кратчайшем временном отрезке. В следующий момент времени (в момент «пояски» дуги) образованная система претерпевает изменения.

Приведем диаграммы тока в момент неустойчивого запуска и проведем спектральный анализ полученных токов для заданных расстояний (рис. 13).

Для междуэлектродного расстояния 0,5 мм (рис. 13а) длительность неустойчивого запуска составила 53 мс, а для расстояния 1 мм (рис. 13б) длительность составила 3,6 мс. В полученных спектрах (рис. 13в, г) присутствуют гармоники различных величин и частот. Спектры сгруппированы относительно основной частоты. Максимальная амплитуда гармоники тока для зазора 0,5 мм составила 0,02976 А на частоте 3759 Гц, в то время как максимальная амплитуда тока для зазора 1 мм составила 0,02363 А при частоте 4984 Гц. Найденные частоты более чем на порядок ниже той частоты, на которой работает силовая часть резонансного источника питания.

Рассмотрим несколько предположений направленных на объяснение данных явлений. Начнем с того, что неустойчивое горение дуги приводит к возбуждению механических и акустических колебаний, которые возникают в моменты изменения тока электрической дуги [15]. Механические и акустические колебания создают модуляцию дуги и, как следствие, модуляцию выходного тока источника питания. В таком случае корпус и элементы двигателя схожи по принципу с камертоном и резонируют на собственной частоте, порождающейся быстрым изменением тока дуги в канале.

Кроме того, стоит отметить, что выходная цепь источника питания содержит электрическую емкость величиной 1,5 мкФ, к которой подключается последовательно вторичная обмотка трансформатора цепи зажигания индуктивностью 6,31 мГн. Такая

цепь образует последовательный контур, включающий двигатель, индуктивность и емкость. Резонансная частота для указанных параметров составляет 1636 Гц, что укладывается в частотный диапазон полученных спектров.

Заключение. В работе рассмотрены основные вопросы, посвященные реализации мостового резонансного источника питания, а также проведен поиск информационных источников, который дал представление о конструкции, технических и эксплуатационных характеристиках источников питания электродуговых двигателей, разрабатываемых для существующих космических аппаратов.

По результатам исследования показана возможность реализации резонансного источника с регулируемым и стабилизированным выходным током мощностью до 300 Вт.

К основным достоинствам источника следует отнести малый вес при относительно большой выходной мощности, быстрый отклик на изменение нагрузки и близкий к синусоидальной форме ток в цепи силового трансформатора.

К недостаткам стоит отнести сложность проектирования и нахождения параметров резонансной цепи, узкий диапазон изменения нагрузки в режиме стабилизации выходного тока. Как было показано, величина рассогласования тока нагрузки и заданного значения составила 22 %. Проблема заключается в нелинейности функции усиления резонансного контура и схеме регулятора. Указанную проблему можно решить путем добавления цифрового регулятора в контуры обратных связей, созданного на микроконтроллере. Применение микроконтроллера позволит создавать регуляторы разных типов, что уменьшит время на настройку оптимальных параметров источника питания. Кроме того, источник должен проектироваться на заданную нагрузку и работать в точке $K_{\text{макс}}$ близкой к пику усиления резонансного контура. Это позволит получить максимальную эффективность источника питания, так как частота коммутации будет уменьшаться и приближаться к резонансной частоте контура.

Обнаруженные в ходе обработки экспериментальных данных явления требуют дополнительных исследований, которые выходят за рамки настоящей работы.

Изучение физических процессов, лежащих в основе дуговых двигателей, является активной областью научных исследований, поэтому необходимо создавать новые технологии и методы управления для улучшения их характеристик.

Библиографический список

1. Надараина Ц. Г., Шестаков И. Я., Фадеев А. А. [и др.]. Повышение энергетической эффективности системы электропи-

- тания перспективных космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2016. Т. 17, № 4. С. 983–988.
2. Blinov V. N., Vavilov I. S., Kositsin V. [et al.]. Design features and research of electrothermal microthrusters with autonomous heating elements for the purposes of small space vehicle orbital manoeuvring // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8, № 27. P. IPL0581-IPL0581. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i27/82937.
3. Боязитов С. Ю., Вастрюков В. Ф., Деев В. Е. [и др.]. Система электропитания корректирующей двигательной установки малого космического аппарата // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Т. 316, № 4. С. 97–101.
4. Ходненко В. П. Деятельность ВНИИЭМ в области исследования, разработки и применения электроракетных двигателей // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2016. Т. 151, № 2. С. 30–41.
5. Gruber R. Power electronics for a 1-kilowatt arcjet thruster // 22nd Joint Propulsion Conference. 1986. P. 1507.
6. Botto G., Parisi G., Detoma E. Arcjet power conditioning unit: design characteristics and preliminary tests // 23rd Joint Propulsion Conference. 1993. IEP-93-045. P. 416–423.
7. Basic Principles of LLC Resonant Half Bridge Converter and DC/DC Dynamic Circuit Simulation Examples. URL: <https://studyres.com/doc/13453382/and9408-basic-principles-of-llc-resonant-half-bridge> (дата обращения: 23.02.2023).
8. Ding H. Design of Resonant Half-Bridge converter using IRS2795 (1, 2) Control IC. International Rectifier: Application Note AN-1160. URL: <https://www.infineon.com/dgdl/an-1160.pdf?fileId=5546d462533600a40153559a85df1115> (дата обращения: 23.02.2023).
9. Федянин В. В., Ячменев П. С. Разработка и экспериментальные исследования источника питания электродуговых микродвигателей для корректирующих двигательных установок малых космических аппаратов // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 46–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-46-50.
10. Abdel-Rahman S. Resonant LLC converter: Operation and design: Application Note AN-2012-0. V. 1 / Infineon Technologies North America (IFNA) Corp. 2012. P. 4.
11. Huang C. W., Liang J. M., Hsu W. T. [et al.]. This person is not on Research Gate, or hasn't claimed this research yet. et al. A design of fly back switched-mode power supply with soft switching using the UC3842 controller // Journal of Physics Conference Series. 2021. Vol. 2020 (1). 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/2020/1/012031.
12. Шалай В. В., Горбунков В. И., Колганов И. В. Математическое моделирование тепловых процессов электроплазменного микродвигателя // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 17–23. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-17-23.
13. Bloxsidge G. J., Dowling A. P., Langhorne P. J. Reheat buzz: an acoustically coupled combustion instability. Part 2. Theory // Journal of Fluid Mechanics. 1988. Vol. 193. P. 445–473.
14. Рюэль Д., Такенс Ф. О природе турбулентности // Странные аттракторы: сб. ст. / под ред. Я. Г. Синая, Л. П. Шильникова. Москва: Мир, 1981. С. 117.

15. Кониов А. Д. Ионифон как альтернативный способ воспроизведения звука // Компьютерные системы и сети: материалы 51-й науч. конф. Минск: Изд-во БГУИР, 2015. С. 104–106.

ФЕДЯНИН Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 1728-1697

ORCID: 0000-0003-3126-9865

AuthorID (SCOPUS): 57194235343

ResearcherID: O-9899-2015

Адрес для переписки: k13201@rambler.ru

ШАЛАЙ Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 2322-6820

AuthorID (РИНЦ): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 2389-6978

AuthorID (РИНЦ): 512746

AuthorID (SCOPUS): 57194237212

ЯЧМЕНЕВ Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

ВАВИЛОВ Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 3468-6744

AuthorID (РИНЦ): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

Для цитирования

Федянин В. В., Шалай В. В., Федоров В. К., Ячменев П. С., Вавилов И. С. Мостовой резонансный источник питания электродугового двигателя малого космического аппарата // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 140–151. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-140-151.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023 г.

© В. В. Федянин, В. В. Шалай, В. К. Федоров,

П. С. Ячменев, И. С. Вавилов



FULL-BRIDGE POWER RESONANT CONVERTER FOR THE ARCJET THRUSTER OF A SMALL SPACECRAFT

In this paper, the applied problems of designing a bridge resonant converter with a high-voltage arc ignition system in the channel of an electric arc motor is solved. The development of a bridge resonant power supply is presented, a review and analysis of power sources of arcjet thruster of various capacities is carried out.

The theoretical aspects of calculating the main parameters of the source are considered. The transfer function describing the gain of the resonant circuit of the power supply is given. With the help of the transfer function, gain diagrams are constructed for various values of the Q-factor of the contour. A prototype of a power supply, a starting system and an arcjet thruster is presented. A series of experiments aimed at identifying the operability of the source is carried out.

According to the experimental results, the maximum output power of the source is 182.4 watts, and the maximum efficiency is 87.5 %. Frequency spectra of the output current of the power supply are obtained. The current-voltage characteristics for the Ar and N₂ are constructed.

In the course of the study, phenomena related to the chaotic dynamics of the arc in the engine channel are discovered. Chaotic fluctuations are observed at the moment of starting the engine and disappeared after steady-state operation.

Keywords: resonant converters, arcjet thruster, small spacecraft, low-orbit grouping, thermoacoustics, deterministic chaos, chaotic dynamics.

References

1. Nadaraia T. G., Shestakov I. Ya., Fadeyev A. A. [et al.]. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti sistemy elektropitaniya perspektivnykh kosmicheskikh apparatov [Improving energy efficiency of power system supply of the perspective space vehicles] // Sibirskiy aerokosmicheskiy zhurnal. *Siberian Aerospace Journal*. 2016. Vol. 17, no. 4. P. 983–988. (In Russ.).
2. Blinov V. N., Vavilov I. S., Kositsin V. [et al.]. Design features and research of electrothermal microthrusters with autonomous heating elements for the purposes of small space vehicle orbital manoeuvring // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8, no. 27. P. IPL0581-IPL0581. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i27/82937. (In Engl.).
3. Boyazitov S. Yu., Vastryukov V. F., Deyev V. E. [et al.]. Sistema elektropitaniya korrektruyushchey dvigatel'noy ustanovki malogo kosmicheskogo apparata [Power supply system for the corrective propulsion system of a small spacecraft] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2010. Vol. 316, no. 4. P. 97–101. (In Russ.).
4. Khodnenko V. P. Deyatel'nost' VNIIEМ v oblasti issledovaniya, razrabotki i primeneniya elektroraketnykh dvigateley [VNIIEМ activities in the area of research, developing and application of electrojet engines] // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ. *Electromechanical Matters. VNIIEМ Studies*. 2016. Vol. 151, no. 2. P. 30–41 (In Russ.).
5. Gruber R. Power electronics for a 1-kilowatt arcjet thruster // 22nd Joint Propulsion Conference. 1986. P. 1507. (In Engl.).
6. Botto G., Parisi G., Detoma E. Arcjet power conditioning unit: design characteristics and preliminary tests // 23rd Joint Propulsion Conference. 1993. IEPC1993-045. P. 416–423. (In Engl.).
7. Basic Principles of LLC Resonant Half Bridge Converter and DC/Dynamic Circuit Simulation Examples. URL: <https://studyres.com/doc/13453382/and9408-basic-principles-of-llc-resonant-half-bridge> (accessed: 23.02.2023). (In Engl.).
8. Ding H. Design of Resonant Half-Bridge converter using IRS2795 (1, 2) Control IC. International Rectifier: Application Note AN-1160. URL: <https://www.infineon.com/dgdl/an-1160.pdf?fileId=5546d462533600a40153559a85df1115> (accessed: 23.02.2023). (In Engl.).
9. Fedyanin V. V., Yachmenev P. S. Razrabotka i eksperimental'nyye issledovaniya istochnika pitaniya elektrodugovykh mikrodvigateley dlya korrektruyushchikh dvigatel'nykh ustanovok malykh kosmicheskikh apparatov [Design and experimental studies of power source of arcjet thrusters for corrective propulsion systems of small spacecraft] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2019. No. 5 (167). P. 46–50. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-46-50. (In Russ.).
10. Abdel-Rahman S. Resonant LLC converter: Operation and design: Application Note AN-2012-0. V. 1 / Infineon Technologies North America (IFNA) Corp. 2012. P. 4. (In Engl.).

11. Huang C. W., Liang J. M., Hsu W. T. [et al.]. This person is not on Research Gate, or hasn't claimed this research yet. et al. A design of fly back switched-mode power supply with soft switching using the UC3842 controller // *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2020 (1). 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/2020/1/012031. (In Engl.).

12. Shalay V. V., Gorbunkov V. I., Kolganov I. V. Matematicheskoye modelirovaniye teplovykh protsessov elektroplazmennogo mikrovdigatelya [Mathematical modeling of plasma thruster device thermal processes] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 17–23. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-17-23. (In Russ.).

13. Bloxside G. J., Dowling A. P., Langhorne P. J. Reheat buzz: an acoustically coupled combustion instability. Part 2. Theory // *Journal of Fluid Mechanics*. 1988. Vol. 193. P. 445–473. (In Engl.).

14. Ryuel D., Takens F. O prirode turbulentnosti [About the nature of turbulence] // *Strannyye attraktory. Strange Attractors* / ed. by. Ya. G. Sinaya, L. P. Shil'nikova. Moscow, 1981. P. 117. (In Russ.).

15. Konikov A. D. Ionofon kak al'ternativnyy sposob vosproizvedeniya zvuka [Ionophone as an alternative way of sound reproduction] // *Komp'yuternyye sistemy i seti. Computer Systems and Networks*. Minsk, 2015. P. 104–106. (In Russ.).

FEDYANIN Viktor Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 1728-1697

ORCID: 0000-0003-3126-9865

AuthorID (SCOPUS): 57194235343

ResearcherID: O-9899-2015

Correspondence address: k13201@rambler.ru

SHALAY Viktor Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Transport, Oil and Gas Storage, Standardization and Certification Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2322-6820

AuthorID (RSCI): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

FEDOROV Vladimir Kuzmich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Electrical Supply of Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2389-6978

AuthorID (RSCI): 512746

AuthorID (SCOPUS): 57194237212

YACHMENEV Pavel Sergeevich, Senior Lecturer of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4744-0940

ORCID: 0000-0003-3483-4321

AuthorID (SCOPUS): 57193405041

ResearcherID: P-5381-2016

VAVILOV Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3468-6744

AuthorID (RSCI): 518332

AuthorID (SCOPUS): 56610211900

ResearcherID: B-2634-2014

For citations

Fedyanin V. V., Shalay V. V., Fedorov V. K., Yachmenev P. S., Vavilov I. S. Full-Bridge power resonant converter for the arcjet thruster of a small spacecraft // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 140–151. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-140-151.

Received March 14, 2023.

© V. V. Fedyanin, V. V. Shalay,

V. K. Fedorov,

P. S. Yachmenev, I. S. Vavilov



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ТОПОЛОГИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ LC-ФИЛЬТРОВ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОТЕРЬ В ПОЛОСЕ ПРОПУСКАНИЯ

В статье предложена разработанная методика автоматизированного синтеза топологий интегральных СВЧ LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания путем минимизации длин межсоединений и поиска оптимальных топологий проводников, катушек индуктивности и конденсаторов. Предложены алгоритмы минимизации потерь и минимизации длины межсоединений LC-фильтров. Оптимизация топологий проводников, катушек индуктивности и конденсаторов происходит на основе верифицированных в кремнии моделей, учитывающих основные характеристики и ограничения технологического процесса, скин-эффект, краевые эффекты, влияния подложки и переходных отверстий. На основе методики разработана САПР в ПО MathCAD, применение которой позволило сократить время проектирования интегральных LC-фильтров до десятков минут, уменьшить потери в полосе пропускания фильтров на 1,1–2,7 дБ, увеличить крутизны фронтов и спадов АЧХ на 47–267 дБ/дек.

Ключевые слова: СВЧ, SnK, синтез фильтров, LC-фильтр, MathCAD, алгоритм оптимизации, методика.

1. Введение. LC-фильтры широко применяются в устройствах типа SnK (в технологических процессах Si, SiGe, GaAs), в частности в качестве входных фильтров сверхширокополосных СВЧ приемников. Потери во входном фильтре напрямую влияют на отношение сигнал/шум приемника, поэтому задача минимизации потерь в полосе пропускания (ПП) фильтра является важной и актуальной.

Одной из основных проблем при проектировании интегральных СВЧ LC-фильтров — это не достоверность моделей конденсаторов, катушек индуктивности и проводников, предоставляемых заводом-изготовителем. В моделях могут не учитываться скин-эффект, краевые эффекты, влияние подложки, вследствие чего модели не отражают реальных характеристик сосредоточенных элементов и проводников.

Минимизация потерь в полосе пропускания фильтров сводится к решению двух основных задач: максимизация добротностей катушек индуктивности и конденсаторов; минимизация потерь в проводниках межсоединений. В литературе представлены различные способы увеличения добротностей катушек индуктивности и уменьшения потерь в проводниках [1–11], в том числе использование нескольких параллельных слоев металлизаций, экранирование, травление подложки и др. Однако они имеют недостатки и ограниченную область эффективного применения, а также отсутствуют

методики, позволяющие оценить эффективность и найти оптимальную комбинацию этих способов для реализации топологии конкретного фильтра в конкретном технологическом процессе.

Целью данной работы является разработка методики автоматизированного синтеза топологий интегральных СВЧ LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания.

2. Минимизация потерь в проводниках. Для поиска оптимальной топологии проводника будет использована эквивалентная П-модель, представленная на рис. 1, которая верифицирована в технологическом процессе SiGe 130 нм [12, 13]. L_{cond} — индуктивность проводника, R_{cond} — активное сопротивление с учетом скин-эффекта и сопротивлений переходных отверстий, C_{ox} — емкость между проводником и подложкой, C_{SHD} — емкость между проводником и заземленным экраном, C_{sub} и R_{sub} — емкость и сопротивление подложки.

Для расчета активного сопротивления на сверхвысоких частотах необходимо учитывать скин-эффект, который заключается в том, что с ростом частоты плотность тока по проводнику распределяется неравномерно и ток протекает преимущественно в поверхностном слое материала проводника.

Для расчета сопротивления проводника с учетом скин-эффекта используются формулы (1–3) [14–15]:

$$R_{skin}(t, \rho, f) = \frac{\rho \cdot l_c}{w_c \cdot t_{eff}(t, \rho, f)}, \quad (1)$$

где l_c — длина проводника, w_c — ширина проводника, ρ — удельное сопротивление проводника, t_{eff} — эффективная толщина проводника:

$$t_{eff}(t, \rho, f) = \delta \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right), \quad (2)$$

где t — физическая толщина проводника, δ — толщина скин-слоя:

$$\delta(\rho, f) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot f}}, \quad (3)$$

где μ , μ_0 — относительная магнитная проницаемость и магнитная проницаемость вакуума ($4\pi \cdot 10^{-7}$), f — частота.

Для нахождения минимально возможного сопротивления массива переходных отверстий между слоями металлизаций проводника была выведена формула (4) для нахождения максимально возможного количества переходных отверстий в проводнике шириной w_c и длиной l_c .

Сопротивление массива переходных отверстий рассчитывается по формуле (5).

$$N_{via} = \text{floor} \left[\left(\frac{w_c - 2c + b}{a + b} \right) \cdot \left(\frac{l_c - 2c + b}{a + b} \right) \right], \quad (4)$$

$$R_{via} = \frac{r_{via}}{N_{via}}, \quad (5)$$

где N_{via} — количество переходных отверстий в массиве, функция $\text{floor}(X)$ возвращает округленное значение X вниз до максимального целого, r_{via} — сопротивление одного переходного отверстия, a — ширина отверстия, b — минимальное расстояние между отверстиями, c — минимальное расстояние между отверстием и краем проводника.

Активное сопротивление проводника с учетом скин-эффекта и сопротивлений переходных отверстий рассчитывается по формуле:

$$R_{cond}(f) = \frac{1}{\frac{1}{R_{skin}(t_n, \rho_n, f)} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{R_{skin}(t_{n-i}, \rho_{n-i}, f) + R_{via}}}, \quad (6)$$

где n — число слоев металлизации в технологическом процессе, m — число используемых слоев металлизации.

Расчет индуктивности прямого проводника прямоугольного сечения осуществляется по формуле [16–19]:

$$L_s(w_c, l_c) = \frac{\mu_0 \cdot l_c}{2\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2l_c}{w_c + t_c} \right) + 0,50049 + \frac{w_c + t_c}{3l_c} \right], \quad (7)$$

где t_c — толщина проводника. Так как силовые линии электромагнитного поля проводника, выполненного в нескольких слоях металлизации, не замыкаются вокруг каждого слоя, а замыкаются вокруг проводника, то толщину проводника для

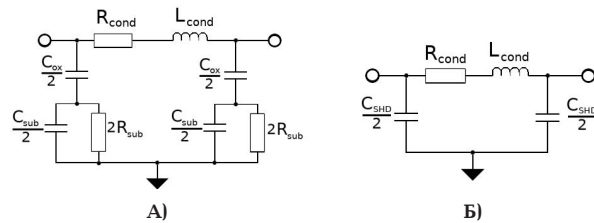


Рис. 1. Модель интегрального проводника (А — без экрана, Б — с экраном)

расчета индуктивности необходимо рассчитывать по формуле:

$$t_c = \sum_{i=n-m+1}^n (t_i) + \sum_{i=n-m+2}^n (h_i - h_{i-1} - t_{i-1}), \quad (8)$$

где t_i и h_i — толщина и высота относительно подложки i -го слоя металлизации.

Для учета краевых эффектов конденсатора в данной работе будет использоваться формула Палмера [20], который аппроксимировал краевые эффекты плоского конденсатора методом Шварца–Кристоффеля для обкладок конечной длины и бесконечно малой толщины (9).

Формула Палмера имеет расхождение с моделированием методом конечных элементов не более 1,3 %, при этом технологический разброс диэлектрической проницаемости SiO_2 может достигать более 5 %.

$$C_{edge}(h) = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot w_c \cdot l_c}{h} \times \left(1 + \frac{h}{\pi \cdot l_c} + \frac{h}{\pi \cdot l_c} \cdot \ln \left(\frac{2\pi \cdot l_c}{h} \right) \right), \quad (9)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками, h — толщина диэлектрика между обкладками. Паразитная емкость C_{ox} рассчитывается по формуле (9):

$$C_{ox} = C_{edge}(h_{ox}),$$

где h_{ox} — толщина диэлектрика между проводником и подложкой, рассчитываемая по формуле (10). Для расчета C_{SHD} толщина диэлектрика между проводником и заземленным экраном в нижнем слое металлизации рассчитывается по формуле (11).

$$h_{ox} = h_{n-m+1}, \quad (10)$$

$$h_{SHD} = h_{n-m+1} - t_1 - h_1, \quad (11)$$

где h_{SHD} — толщина диэлектрика между проводником и экраном.

Для расчета паразитной емкости подложки используется формула (12), которая получена методом изображений и учитывает краевые эффекты [21–22].

$$C_{sub} = \frac{\varepsilon_{sub} \cdot \varepsilon_0 \cdot w_c \cdot l_c}{2t_{sub} + \sqrt{\frac{w_c \cdot l_c}{\pi}} - \sqrt{4t_{sub}^2 + \frac{w_c \cdot l_c}{\pi}}}, \quad (12)$$

где ε_{sub} и t_{sub} — диэлектрическая проницаемость и толщина подложки.

Тестовые измерения емкостей и сопротивлений подложки показали, что формула (12) имеет большую погрешность только при площади проводника более 40000 мкм² [21].

При наличии металлизации с обратной стороны чипа паразитная емкость подложки рассчитывается по формуле (9), где за расстояние между обкладками нужно принять t_{sub} , а за диэлектрическую проницаемость — ε_{sub} .

Сопротивление подложки находится по формуле [22]:

$$R_{sub} = \frac{\rho_{sub} \cdot \varepsilon_{sub} \cdot \varepsilon_0}{C_{sub}}, \quad (13)$$

где ρ_{sub} — удельное сопротивление подложки.

Для оценки потерь проводника выведены формулы (14–18). Формулы (15–17) применимы для проводника без экрана, формула (18) — для проводника со сплошным заземленным экраном в нижнем слое металлизации под проводником.

$$Z2_{cond}(f) = R_{cond}(f) + i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L_s(w_c, l_c), \quad (14)$$

$$Z_{ox}(f) = \frac{1}{i \cdot \pi \cdot f \cdot C_{edge}(h_{ox})}, \quad (15)$$

$$Z_{sub}(f) = \frac{1}{i \cdot \pi \cdot f \cdot C_{sub}}. \quad (16)$$

$$Z1_{cond}(f) = Z_{ox}(f) + \frac{2Z_{sub}(f) \cdot R_{sub}}{2R_{sub} + Z_{sub}(f)}, \quad (17)$$

$$Z1_{cond}(f) = \frac{1}{i \cdot \pi \cdot f \cdot C_{edge}(h_{SHD})}. \quad (18)$$

Матрица А-параметров проводника как четырехполюсника рассчитывается по формуле (19). Коэффициент передачи из матрицы А-параметров рассчитывается по известной формуле (20).

$$A = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z2_{cond}(f)}{Z1_{cond}(f)} & Z2_{cond}(f) \\ \frac{2}{Z1_{cond}(f)} + \frac{Z2_{cond}(f)}{(Z1_{cond}(f))^2} & 1 + \frac{Z2_{cond}(f)}{Z1_{cond}(f)} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$K(f) = 20 \times \lg \left(\frac{Z_{n2}}{A_{11} \cdot Z_{n2} + A_{12} + Z_{n1} \cdot (A_{21} \cdot Z_{n2} + A_{22})} \right), \quad (20)$$

где Z_{n1} и Z_{n2} — сопротивления источника сигнала и нагрузки соответственно.

На рис. 2 представлен разработанный алгоритм расчета оптимальной топологии проводников межсоединений (на основе верифицированной модели проводника) при заданной длине проводника и частоте, на которой требуется оптимизация. Топология проводника оптимизируется по критерию получения максимального коэффициента передачи на заданной частоте.

w_{min} , w_{max} , min_step — ограничения технологического процесса: минимальная ширина, максимальная ширина, минимальный шаг изменения длины и ширины проводника соответственно. Перемен-

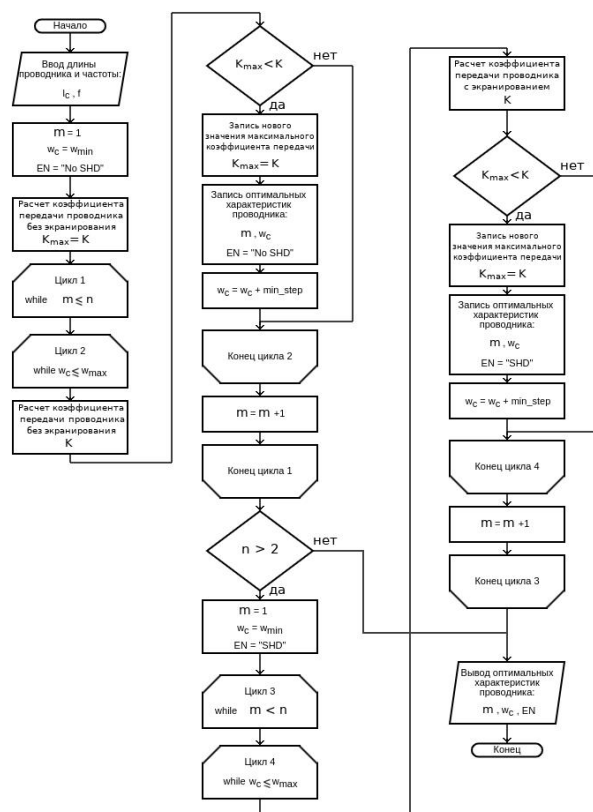


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимальной топологии проводника

ная EN характеризует наличие ("SHD") или отсутствие ("NoSHD") заземленного экрана под проводником.

В циклах 1 и 3 рассчитывается оптимальное количество используемых слоев металлизаций при заданной ширине проводника без использования экрана и с экраном соответственно. В циклах 2 и 4 рассчитываются оптимальные ширины проводника при заданном количестве используемых слоев металлизаций без использования экрана и с экраном соответственно. Таким образом, находится топология проводника с минимальными потерями на заданной частоте (наивысшей частоте полосы пропускания), а также решается задача целесообразности использования экранирования под проводником.

Разработанный алгоритм реализован в качестве программы в ПО MathCad. Расчет оптимальной топологии занимает доли единицы секунд.

3. Минимизация длины проводников межсоединений. Длина межсоединений в LC-фильтре зависит от конфигурации фильтра, габаритов сосредоточенных элементов и минимального расстояния между сосредоточенными элементами.

Минимальное расстояние между катушками индуктивности предлагается принять расстоянию, на котором их взаимная индуктивность будет менее 1 % от полных индуктивностей катушек. Анализ экспериментальных образцов фильтров показал, что при таких расстояниях можно пренебречь их взаимной индуктивностью, и это не оказывает влияния на АЧХ фильтра.

Для двух восьмиугольных или круглых катушек индуктивности взаимная индуктивность между катушками будет меньше, чем у квадратных, поэтому для упрощения расчетов минимальное расстояние между ними будет рассчитываться как для квадратных катушек.

Для упрощенного расчета взаимной индуктивности двух одинаковых катушек ограничим топологию катушек только полными витками. Наиболее точным методом расчета индуктивности является метод, заключающийся в разбиении катушки на прямоугольные сегменты и расчете всех собственных и взаимных индуктивностей всех сегментов [16–19].

Собственные индуктивности сегментов катушки рассчитываются по формуле (7), где длина сегментов i -го витка рассчитывается по формуле:

$$l_{seg}(i) = d_{in} + w + 2i(w + s), \quad (21)$$

где d_{in} — внутренний диаметр катушки, w — ширина витка, s — зазор между витками.

Взаимная индуктивность параллельных сегментов одинаковой длины рассчитывается по формуле [9–12]:

$$M(w, l, d) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot l \cdot Q(w, l, d), \quad (22)$$

где d — расстояние между сегментами, l — длина сегментов, $Q(w, l, d)$ — параметр взаимной индуктивности, характеризующий удельную взаимную индуктивность на единицу длины проводника:

$$Q(w, l, d) = \ln \left[\frac{l}{GMD(w, d)} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{GMD(w, d)} \right)^2} \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{GMD(w, d)}{l} \right)^2} + \frac{GMD(w, d)}{l}, \quad (23)$$

где $GMD(w, d)$ — среднегеометрическое расстояние между сегментами:

$$GMD(w, d) = \exp \left[\frac{\ln(d) - \frac{w^2}{12d^2} - \frac{w^4}{60d^4} - \frac{w^6}{168d^6} - \frac{w^8}{360d^8} - \frac{w^{10}}{660d^{10}}}{1} \right]. \quad (24)$$

При сонаправленности векторов протекания тока в сегментах взаимная индуктивность будет иметь положительный знак, при разнонаправленности — отрицательный.

Взаимная индуктивность параллельных сегментов разной длины (l и m) и одинаковой ширины (w) рассчитывается по формуле [9–12]:

$$M_{dts}(w, l, m, d) = M \left(w, \frac{l+m}{2}, d \right) - M \left(w, \frac{|l-m|}{2}, d \right). \quad (25)$$

Тогда взаимная индуктивность i -го и p -го полных витков одной катушки будет находиться по формулам:

$$M_{coils}(i, p) = 8 \cdot M_{dts}(w, l_{seg}(i), l_{seg}(p), d_{pos}(i, p)) - 8 \cdot M_{dts}(w, l_{seg}(i), l_{seg}(p), d_{neg}(i, p)), \quad (26)$$

$$d_{pos}(i, p) = (i - p) \cdot (w + s), \quad (27)$$

$$d_{neg}(i, p) = d_{in} + 2 \min(i, p) \cdot (w + s) + w + d_{pos}, \quad (28)$$

где d_{pos} — расстояния между сегментами разных витков с положительной взаимной индуктивностью, d_{neg} — с отрицательной.

Полная индуктивность каждой из катушек рассчитывается по выведенной формуле:

$$L_{full} = \sum_{i=1}^N \left[4 \cdot L_s(w, l_{seg}(i)) + \sum_{n=1}^N \left(\frac{M_{coils}(i, n)}{2} \right) \right], \quad (29)$$

где N — количество витков катушки.

Для расчета взаимной индуктивности двух одинаковых квадратных катушек индуктивности, находящихся на расстоянии X , были выведены формулы (30–33).

$$M_{ind} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^N \left[2M_{dts}(w, l_{seg}(i), l_{seg}(p), d_{pos1}(i, p)) + 2M_{dts}(w, l_{seg}(i), l_{seg}(p), d_{pos2}(i, p)) - 4M_{dts}(w, l_{seg}(i), l_{seg}(p), d_{neg}(i, p)) \right], \quad (30)$$

$$d_{pos1}(i, p) = X + w + (w + s) \cdot (2N - i - p), \quad (31)$$

$$d_{pos2}(i, p) = X + 2d_{in} + 3w + (w + s) \cdot (2N + i + p), \quad (32)$$

$$d_{neg}(i, p) = X + 2w + (w + s) \times (2N - i - p) + d_{in} + 2 \max(i, p) \cdot (w + s), \quad (33)$$

где $d_{pos}(i, p)$ — расстояния между сегментами i -го витка одной катушки и p -го витка второй катушки с положительной взаимной индуктивностью, $d_{neg}(i, p)$ — с отрицательной.

Коэффициент, отражающий отношение взаимной индуктивности двух катушек индуктивности и их полных индуктивностей рассчитывается по формуле:

$$k_{ind} = \frac{M_{ind}}{2 \cdot L_{full}} \cdot 100 \%. \quad (34)$$

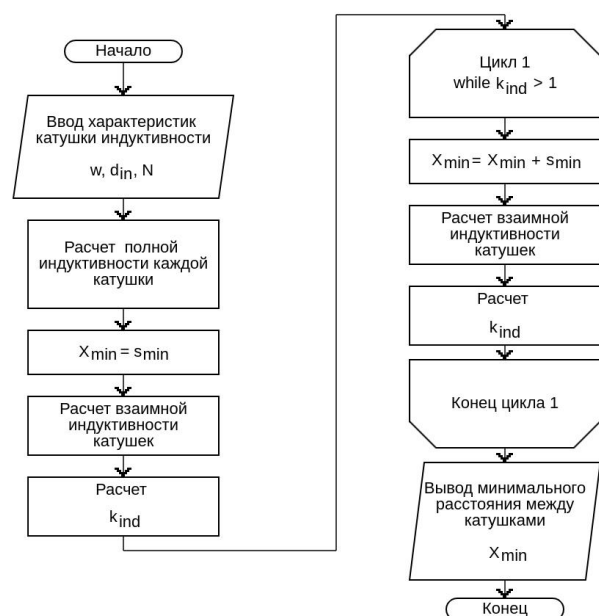


Рис. 3. Алгоритм поиска минимального расстояния между катушками индуктивности

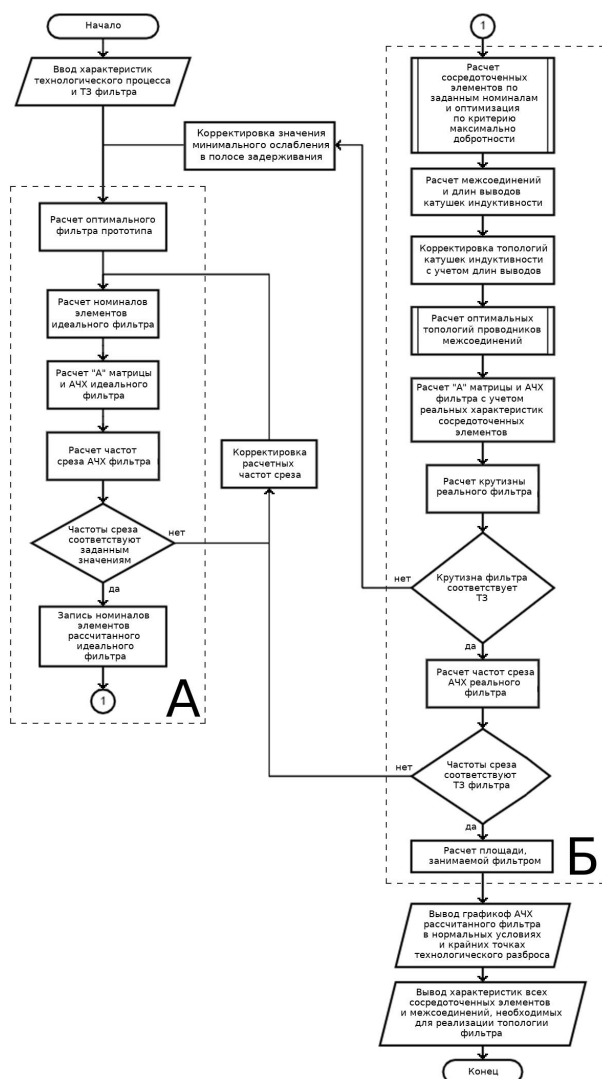


Рис. 4. Алгоритм автоматизированного расчета оптимизированных интегральных LC-фильтров

Разработанный алгоритм поиска минимального расстояния между катушками индуктивности представлен на рис. 3. Минимальное расстояние между двумя катушками с разной топологией выбирается большее из двух, рассчитанных по предложенному алгоритму s_{min} — минимальное расстояние между проводниками (ограничение технологического процесса), X_{min} — рассчитанное минимальное расстояние между катушками.

Предложенная методика поиска минимального расстояния между катушками позволяет определить минимальные длины проводников межсоединений при исключении влияния паразитных взаимных индуктивностей между катушками индуктивности.

4. Автоматизированный синтез топологий интегральных LC-фильтров. Разработанный алгоритм автоматизированного синтеза интегральных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания представлен на рис. 4.

В блоке "А" рассчитываются номиналы элементов идеального фильтра (фильтра с идеальными конденсаторами, катушками индуктивности без учета проводников межсоединений). Принципиальная схема фильтра и номиналы элементов рассчитываются по фильтрам-прототипам эллиптических ФНЧ, представленным во множестве источников, в том числе в справочниках по расчету фильтров

авторов Зааль Р. и Ханзел Г. [23–24]. Выбирается фильтр-прототип, соответствующий техническому заданию и имеющий минимальный порядок и минимальную неравномерность в полосе пропускания.

Для построения АЧХ необходимо найти матрицу А-параметров (ABCD-матрицу) фильтра, которая рассчитывается согласно теории простых и сложных четырехполюсников [25]. Коэффициент передачи фильтра рассчитывается по формуле (20).

В блоке "Б" рассчитывается топология реального фильтра с оптимизированными топологиями катушек индуктивности, конденсаторов, проводников межсоединений. Оптимизация топологий катушек индуктивности, конденсаторов не рассматривается в данной работе. Проводники межсоединений оптимизируются по критерию наибольшего коэффициента передачи на наивысшей частоте полосы пропускания.

Ввиду ограниченных добротностей реальных интегральных катушек индуктивности, конденсаторов и потерь в проводниках межсоединений, АЧХ реального фильтра может отличаться от АЧХ идеального фильтра. Для получения характеристик реального фильтра в рамках требований технического задания в алгоритме предусмотрены корректировки частот среза и крутизны фильтра.

Поиск минимального ослабления в полосе пропускания и частоты, при которой достигается минимальное ослабление, осуществляется методом равномерного поиска в диапазоне заданных техническими требованиями частот среза фильтра с заданным шагом $k/2$. Частоты среза определяются методом равномерного поиска от частоты, при которой достигается минимальное ослабление, до частоты, при которой ослабление увеличивается на 3 дБ относительно минимального.

Корректировка расчетных частот среза происходит по формуле (35) до момента, пока частоты среза АЧХ не будут находиться в диапазоне заданного значения с заданной точностью ($f_0 \pm k/2$).

$$f_{new} = \frac{f_0 \cdot f_{old}}{f_{sr}}, \quad (35)$$

где f_0 — частота среза, заданная техническим заданием; f_{old} — расчетное значение частоты среза до корректировки, f_{sr} — частота среза, найденная по АЧХ фильтра до корректировки, f_{new} — расчетное значение частоты среза после корректировки.

После корректировки частот среза происходит перерасчет номиналов элементов идеального фильтра и оптимизация топологии фильтра для новых номиналов элементов.

Ослабление в полосе задерживания относительно полосы пропускания синтезированного фильтра рассчитывается по формуле (36) для ФНЧ и по формуле (37) для ФВЧ.

$$As_{LPF} = \left| K \left(\frac{f_{sr_LPF}}{\Omega s_{LPF}} \right) - K_{max} \right|, \quad (36)$$

$$As_{HPF} = \left| K (\Omega s_{HPF} \cdot f_{sr_HPF}) - K_{max} \right|, \quad (37)$$

где K_{max} — максимальный коэффициент передачи в полосе пропускания; f_{sr} — найденная по АЧХ частота среза реального фильтра; Ωs — нормированные границы полос задерживания.

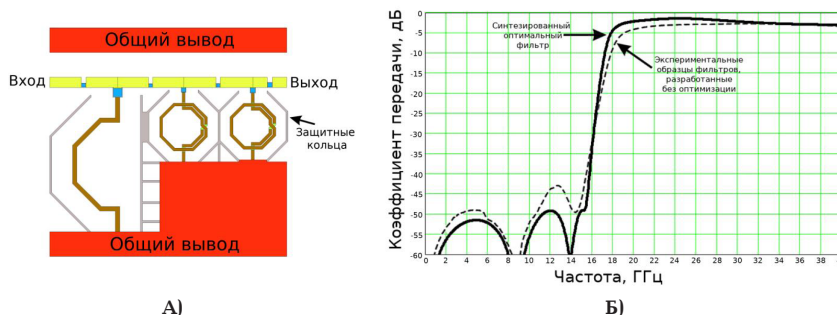


Рис. 5. Топология (А) и АЧХ (Б) синтезированного ФВЧ 18 ГГц

Таблица 1

Сравнение характеристик ФВЧ 18 ГГц

Характеристика	Синтезированный оптимальный фильтр	Экспериментальные образцы неоптимизированного фильтра	ТЗ
Частота среза, ГГц	18,04 – 18,05	18,8 – 18,9	18 ± 0,1
Минимальное ослабление в ПП, дБ	1,4 – 1,5	2,6 – 2,8	—
Ослабление на частоте 15 ГГц относительно ПП, дБ	47,5 – 47,9	43,8 – 44,0	≥ 40
Крутизна фронта АЧХ, дБ/дек.	371 – 374	324 – 325	≥ 333
Ослабление на частоте 40 ГГц, дБ	2,9 – 3,1	3,4	—
Занимаемая площадь, мм ²	0,31	0,29	—

Крутизна АЧХ фильтра определяется по формулам (38 – 39) между двумя точками АЧХ: на частоте среза и на границе полосы задерживания.

$$g_{LPF} = \frac{10}{\Omega s_{LPF}} \cdot \left| K(f_{sr_LPF}) - K(f_{sr_LPF} \cdot \Omega s_{LPF}) \right|, \quad (38)$$

$$g_{HPF} = 10 \cdot \Omega s_{HPF} \cdot \left| K(f_{sr_HPF}) - K\left(\frac{f_{sr_HPF}}{\Omega s_{HPF}}\right) \right|, \quad (39)$$

где g_{HPF} и g_{LPF} — крутизны фронта и спада АЧХ соответственно [дБ/дек].

Если рассчитанное ослабление в полосе задерживания меньше значения, заданного техническим заданием, то необходимое значение ослабления увеличивается на разницу между ослаблением в реальном фильтре и ослаблением, заданным в ТЗ. Так осуществляется поправка крутизны фильтра для технологического процесса, в котором синтезируется фильтр, с учетом потерь в полосе пропускания.

Корректировка крутизны происходит один раз при первом расчете реального фильтра. После корректировки необходимого ослабления в полосе задерживания находится новый оптимальный фильтр-прототип, удовлетворяющий требованиям ТЗ, с учетом поправок на технологический процесс, перерасчет номиналов элементов идеального фильтра и оптимизация топологии фильтра для новых номиналов элементов.

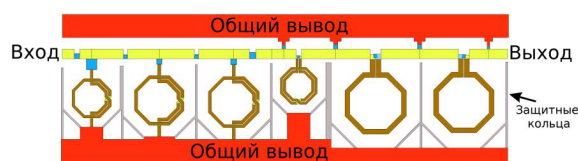
Выходными данными разработанного алгоритма являются: площадь, занимаемая ядром синтезированного фильтра без учета площади проводников общего вывода; все характеристики топологий катушек индуктивности, конденсаторов и проводников межсоединений, необходимые для реализации этой топологии.

Разработанный алгоритм реализован в качестве САПР автоматизированного синтеза оптимальной топологии СВЧ фильтра в среде MathCAD [26]. В программе для наглядности рассчитываются графики АЧХ синтезированного реального фильтра в нормальных условиях и крайних точках разброса технологического процесса. Автоматизированный синтез оптимальной топологии фильтра занимает единицы минут.

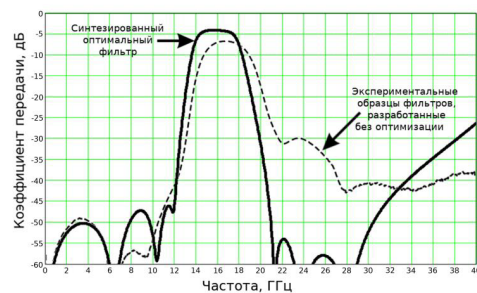
5. Синтезированные оптимальные СВЧ LC-фильтры. Для оценки эффективности автоматизированного синтеза с минимизацией потерь в полосе пропускания сравним АЧХ синтезированного оптимального фильтра с АЧХ экспериментальных образцов фильтров, выполненных в технологическом процессе SiGe 130 нм. Процесс имеет 6 медных слоев металлизации, из которых четыре нижних имеют толщину 0,4 мкм, а два верхних — 3,2 мкм, толщина диэлектрика между слоями металлизаций и подложки составляет от 1 до 8 мкм, удельное сопротивление подложки не более 0,5 Ом·м.

Разработанная топология и АЧХ синтезированного ФВЧ 18 ГГц (эллиптический фильтр 7-го порядка) представлена на рис. 5. Для сравнения характеристик синтезированного фильтра с техническим заданием и характеристиками экспериментальных образцов не оптимального фильтра данные сведены в табл. 1. Характеристики синтезированного фильтра приведены в крайних точках технологического разброса.

В фильтрах, реализованных в технологических процессах Si, SiGe и других технологических процессах, с удельным сопротивлением подложки менее 10 [Ом·м], паразитные каналы связи через подложку между сосредоточенными элементами и проводниками межсоединений оказывают значительное влияние на добротность элементов и АЧХ фильтров [27 – 28]. Для исключения влияния



А)



Б)

Рис. 6. Топология (А) и АЧХ (Б) синтезированного ПФ 14–18 ГГц

Таблица 2

Сравнение характеристик ПФ 14–18 ГГц

Характеристика	Синтезированный оптимальный фильтр	Экспериментальные образцы неоптимизированного фильтра	ТЗ
Нижняя частота среза, ГГц	13,96 – 13,98	14,5 – 14,8	14±0,1
Частота среза, ГГц	17,96 – 18,02	18,9 – 19,1	18±0,1
Минимальное ослабление в ПП, дБ	4,0 – 4,4	6,7 – 6,9	—
Ослабление на частоте 11 ГГц относительно ПП, дБ	44,4 – 44,9	39,2 – 39,4	≥ 40
Крутизна фронта АЧХ, дБ/дек.	325 – 329	271 – 273	≥ 314
Ослабление на частоте 21 ГГц, дБ	49,3 – 51,0	19,4 – 20,1	≥ 40
Крутизна спада АЧХ, дБ/дек.	397 – 411	149 – 154	≥ 343
Занимаемая площадь, мм²	0,44	0,29	—

паразитных каналов связи через подложку для интегральных катушек индуктивности и конденсаторов, используемых в СВЧ устройствах, применяют защитные кольца, выполненные в нижнем слое металлизации с переходными отверстиями к подложке, подключенные к общему выводу [27–28]. Использование короткозамкнутых защитных колец уменьшает индуктивность и добротность катушек, но результаты исследований, опубликованные в [29–30], показывают, что использование не замкнутых заземленных защитных колец позволяет значительно уменьшить влияние паразитных каналов связи через подложку, сохранив при этом индуктивность и добротность катушек индуктивности. Влияние паразитных каналов связи через подложку на АЧХ фильтра при отсутствии заземленных защитных колец описано в статье [13].

По данным табл. 1 видно, что синтезированный оптимальный фильтр по сравнению с характеристиками не оптимального фильтра соответствует техническому заданию, имеет минимальное ослабление в полосе пропускания на 1,1 дБ меньше, имеет крутизну на 47 дБ/дек больше, площадь фильтра при этом увеличилась незначительно.

Синтезированная топология ПФ 14–18 ГГц с минимизацией потерь в полосе пропускания представлена на рис. 6. Фильтр является каскадным соединением эллиптических ФВЧ и ФНЧ 7-х порядков. Сравнительные характеристики сведены в табл. 2.

Видно, что синтезированный оптимальный фильтр имеет потери в полосе пропускания на 2,5–2,7 дБ меньше, крутизну фронта АЧХ на 54–56 дБ/дек больше, крутизну среза АЧХ на 248–267 дБ/дек больше, чем фильтр, разработанный без

оптимизации топологий катушек индуктивности, конденсаторов, проводников.

6. Заключение. Предложен алгоритм поиска оптимальной топологии проводника по критерию максимального коэффициента передачи на требуемой частоте. В процессе оптимизации проверяется целесообразность использования заземленного экрана под проводником, применение которого уменьшает потери интегральных проводников путем исключения влияния подложки с относительно низким удельным сопротивлением.

Предложена методика поиска минимального расстояния между катушками, которая позволяет минимизировать длину проводников межсоединений, следовательно, уменьшить потери в полосе пропускания фильтров, при этом исключая влияние паразитных взаимных индуктивностей между катушками фильтра.

Предложена методика синтеза топологий интегральных СВЧ LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания. На основе предложенной методики разработано САПР синтеза оптимальных топологий интегральных СВЧ LC-фильтров в ПО MathCad.

Выявлено, что синтезированные оптимальные фильтры по предложенной методике имеют потери в полосе пропускания на 1,1–2,7 дБ меньше, крутизны фронтов и спадов АЧХ на 47–267 дБ/дек больше, чем экспериментальные образцы ранее разработанных фильтров без оптимизации. Также выявлено, что синтезированные оптимальные фильтры имеют на порядок меньший разброс частот среза в крайних точках технологического разброса, что значительно повышает повторяемость характеристик производимых фильтров.

Синтезированные ПФ 14–18 ГГц и ФВЧ 18 ГГц с минимизацией потерь в полосе пропускания были использованы в качестве сложнофункциональных блоков в сверхширокополосных СВЧ приемниках типа СнК, разработанных в рамках НИОКР № АААА-А20-120073190008-5 от 31.07.2020.

С использованием предложенной методики в рамках НИР № 122091300037-0 от 13.09.2022 разработаны LC-фильтры, применяемые в качестве СФ-блоков модулятора телевизионных сигналов с выходным частотным диапазоном 1–1,4 ГГц. Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)».

Библиографический список

- Kim J., Plouchart J. K., Zamdmer N. [et al.]. High-Performance Three-Dimensional On-chip Inductors in SOI CMOS Technology for Monolithic RF Circuit Applications // Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2003 IEEE. 2003. P. 591–594. DOI: 10.1109/RFIC.2003.1214016.
- Danesh M., Long J. R. Differentially Driven Symmetric Microstrip Inductors // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, Issue 1. P. 332–341. DOI: 10.1109/22.981285.
- Chen J., Liou J. J. Improved and Physics-Based Model for Symmetrical Spiral Inductors // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. Vol. 53, Issue 6. P. 1300–1309. DOI: 10.1109/TED.2006.874089.
- Chen J., Liou J. J. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview // Journal of Semiconductor Technology and Science. 2004. Vol. 4, № 3. P. 149–167.
- Liang H.-B., Lin Y.-S., Chen C.-C. [et al.]. Optimization of PGS Pattern of Transformers/Inductors in Standard RF BiCMOS Technology for RFIC Applications // Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2006 IEEE. 2006. 4 p. DOI: 10.1109/RFIC.2006.1651205.
- Royet A. S., Barbé J. C., Valorge O. [et al.]. Constant. Experimental and Simulation Results on Si Integrated Inductor Efficiency for Smart RF-ICs // 21st IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). 2014. P. 368–370. DOI: 10.1109/ICECS.2014.7049998.
- Shi J., Yin W.-Y., Liao H. [et al.]. The Enhancement of Q Factor for Patterned Ground Shield Inductors at High Temperatures // IEEE Transactions on Magnetics. 2006. Vol. 42, Issue 7. P. 1873–1875. DOI: 10.1109/TMAG.2006.874186.
- Zhang Z., Liao X. Micromachined GaAs MMIC-Based Spiral Inductors With Metal Shores and Patterned Ground Shields // IEEE Sensors Journal. 2012. Vol. 12, Issue 6. P. 1853–1860. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2178066.
- Kaynak M., Korndörfer F., Wipf C. [et al.]. High-Q passives for mm-wave SiGe applications // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2009. P. 194–197. DOI: 10.1109/BIPOL.2009.5314243.
- López-Villegas J. M., Samitier J., Cane C. [et al.]. Bausells. Improvement of the Quality Factor of RF Integrated Inductors by Layout Optimization // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol. 48, Issue 1. P. 76–83. DOI: 10.1109/22.817474.
- Korndörfer F., Kaynak M., Mühlhaus V. Simulation and Measurement of Back Side Etched Inductors // The 5th European Microwave Integrated Circuits Conference. 2010. P. 389–392.
- Ерохин В. В. Верификация модели интегральной катушки индуктивности для СВЧ LC-фильтров в Si- и SiGe-системах на кристалле // Вестник СибГУТИ. 2022. № 2 (58). С. 94–109. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-2-94-109.
- Ерохин В. В., Садыков Ж. Б., Блинков С. Д. Влияние топологии общего вывода на АЧХ интегрального СВЧ LC-фильтра // Динамика систем, механизмов и машин. 2022. Т. 10, № 2. С. 57–64. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-2-57-64.
- Ruehli A. E., Antonini G., Jiang L. Skin-Effect Model for Round Wires in PEEC. International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. 2012. P. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396927.
- Chan R.-J., Guo J.-C. Analysis and Modeling of Skin and Proximity Effects for Millimeter-Wave Inductors Design in Nanoscale Si CMOS // 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. 2014. P. 13–16. DOI: 10.1109/EuMIC.2014.6997779.
- Koutsoyannopoulos Y. K., Papananos Y. Systematic Analysis and Modeling of Integrated Inductors and Transformers in RF IC Design // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. 2000. Vol. 47, Issue 8. P. 699–713. DOI: 10.1109/82.861403.
- Chen J., Liou J. J. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview // Journal of Semiconductor Technology and Science. 2004. P. 149–167.
- Shaltout A. H., Gregori S. Optimizing the Inductance Time-Constant Ratio of Polygonal Integrated Inductors // IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). 2018. P. 448–451. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623945.
- Hsu H.-M., Chang J.-Z., Chien H.-C. Coupling Effect of On-Chip Inductor With Variable Metal Width // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2007. Vol. 17, Issue 7. P. 498–500. DOI: 10.1109/LMWC.2007.899306.
- Elsaadi M., Tayel M. B., Steenson D. P. An Empirical Formula of Fringing Field Capacitance for MEMS Tunable Capacitor Actuators // IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA. 2021. P. 674–678. DOI: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464509.
- Goni A., del Pino J., Gonzalez B. [et al.]. An Analytical Model of Electric Substrate Losses for Planar Spiral Inductors on Silicon // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol. 54, Issue 3. P. 546–553. DOI: 10.1109/TED.2006.890366.
- Sathya Sree J., Vanukuru V., Nair D. R. [et al.]. A Substrate Model for On-Chip Tapered Spiral Inductors With Forward and Reverse Excitations // IEEE Transactions on Electron Devices. 2019. Vol. 66, Issue 1. P. 4. DOI: 10.1109/TED.2018.2873796.
- Зааль Р. Справочник по расчету фильтров: пер. с нем. Москва: Радио и связь, 1983. 752 с.
- Ханзел Г. Е. Справочник по расчету фильтров: пер. с англ. / под ред. А. Е. Знаменского. Москва: Советское радио, 1974. 288 с.
- Татур Т. А. Основы теории электрических цепей. Москва: Высшая школа, 1980. 271 с.
- Ерохин В. В., Завьялов С. А. Автоматизированный синтез топологий СВЧ интегральных высокоизбирательных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2023. № 2023660979.
- Ahyoune S., López-Villegas J., Siero J. [et al.]. Effects of Shielding Structures on the Performance of Planar Inductors // Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS). 2016. DOI: 10.1109/DCIS.2016.7845353.
- Ali M. H. M., Ler C.-L., Rustagi S. C. [et al.]. The Impact of Electromagnetic Coupling of Guard Ring Metal Lines on the Performance of On-chip Spiral Inductor in Silicon CMOS // 2nd Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED). 2010. P. 285–288. DOI: 10.1109/ASQED.2010.5548257.
- Kojima K., Ohguro T., Momose H. S. [et al.]. Guard-ring design for high-performance RF CMOS // International

Conference on Solid State Devices and Materials. 2002. P. 400–401. DOI: 10.7567/SSDM.2002.P2-9.

30. Pun A., Yeung T., Lau J. [et al.]. Experimental Results and Simulation of Substrate Noise Coupling via Planar Spiral Inductor in RF ICs // International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest. 1997. P. 325–328. DOI: 10.1109/IEDM.1997.650393.

ЕРОХИН Виктор Валерьевич, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Системы на кристалле» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 4231-2673

AuthorID (РИНЦ): 918830

Адрес для переписки: viktor_erohin@mail.ru

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радио-

технические устройства и системы диагностики», старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Системы на кристалле» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6758-0406

ORCID: 0000-0001-5114-2074

AuthorID (SCOPUS): 57221599219

ResearcherID: E-8661-2014

Адрес для переписки: zavyalov62@mail.ru

Для цитирования

Ерохин В. В., Завьялов С. А. Автоматизированный синтез топологий интегральных сверхвысокочастотных LC-фильтров с минимизацией потерь в полосе пропускания // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 152–161. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-152-161.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023 г.

© В. В. Ерохин, С. А. Завьялов

UDC 621.372.54

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-152-161

EDN: OJPIEK

V. V. EROKHIN
S. A. ZAVYALOV

Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia

AUTOMATED SYNTHESIS OF INTEGRATED MICROWAVE LC-FILTERS LAYOUTS WITH PASSBAND LOSSES MINIMIZATION

The paper proposes the developed technique for automated synthesis of integrated microwave LC filter layouts with passband losses minimization by minimizing interconnection lengths and searching for optimal layouts of conductors, inductors, and capacitors. Algorithms for minimizing losses and length of LC-filter interconnections are proposed. The layouts of conductors, inductors, and capacitors are optimized based on silicon-verified models that take into account the main characteristics and limitations of the process, skin effect, edge effects, substrate and via influences. The CAD is developed in MathCAD software based on the proposed technique. The use of CAD made it possible to reduce the engineering time for integrated LC-filters to tens of minutes, reduce the filters passband losses by 1,1–2,7 dB and increase the AFCs gain slope by 47–267 dB/dec.

Keywords: microwave, SoC, filter synthesis, LC-filter, MathCAD, optimization algorithm, technique.

References

1. Kim J., Plouchart J. K., Zamdmer N. [et al.]. High-Performance Three-Dimensional On-chip Inductors in SOI CMOS Technology for Monolithic RF Circuit Applications // Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2003 IEEE. 2003. P. 591–594. DOI: 10.1109/RFIC.2003.1214016. (In Engl.).
2. Danesh M., Long J. R. Differentially Driven Symmetric Microstrip Inductors // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, Issue 1. P. 332–341. DOI: 10.1109/22.981285. (In Engl.).
3. Chen J., Liou J. J. Improved and Physics-Based Model for Symmetrical Spiral Inductors // IEEE Transactions on Electron Devices. 2006. Vol. 53, Issue 6. P. 1300–1309. DOI: 10.1109/TED.2006.874089. (In Engl.).
4. Chen J., Liou J. J. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview // Journal of Semiconductor Technology and Science. 2004. Vol. 4, no. 3. P. 149–167. (In Engl.).
5. Liang H.-B., Lin Y.-S., Chen C.-C. [et al.]. Optimization of PGS Pattern of Transformers/Inductors in Standard RF BiCMOS Technology for RFIC Applications // Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, 2006 IEEE. 2006. 4 p. DOI: 10.1109/RFIC.2006.1651205. (In Engl.).
6. Royet A. S., Barbé J. C., Valorge O. [et al.]. Constant. Experimental and Simulation Results on Si Integrated Inductor

Efficiency for Smart RF-ICs // 21st IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). 2014. P. 368–370. DOI: 10.1109/ICECS.2014.7049998. (In Engl.).

7. Shi J., Yin W.-Y., Liao H. [et al.]. The Enhancement of Q Factor for Patterned Ground Shield Inductors at High Temperatures // IEEE Transactions on Magnetics. 2006. Vol. 42, Issue 7. P. 1873–1875. DOI: 10.1109/TMAG.2006.874186. (In Engl.).

8. Zhang Z., Liao X. Micromachined GaAs MMIC-Based Spiral Inductors With Metal Shores and Patterned Ground Shields // IEEE Sensors Journal. 2012. Vol. 12, Issue 6. P. 1853–1860. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2178066. (In Engl.).

9. Kaynak M., Korndörfer F., Wipf C. [et al.]. High-Q passives for mm-wave SiGe applications // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting. 2009. P. 194–197. DOI: 10.1109/BIPOL.2009.5314243. (In Engl.).

10. López-Villegas J. M., Samitier J., Cane C. [et al.]. Bausells. Improvement of the Quality Factor of RF Integrated Inductors by Layout Optimization // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol. 48, Issue 1. P. 76–83. DOI: 10.1109/22.817474. (In Engl.).

11. Korndörfer F., Kaynak M., Mühlhaus V. Simulation and Measurement of Back Side Etched Inductors // The 5th European Microwave Integrated Circuits Conference. 2010. P. 389–392. (In Engl.).

12. Erokhin V. V. Verifikatsiya modeli integral'noy katushki induktivnosti dlya SVCh LC-fil'trov v Si- i SiGe-sistemakh na kristalle [Integrated Inductor Model Verification for Microwave LC-filters in Si and SiGe Systems on a Chip] // Vestnik SibGUTI. The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science. 2022. No. 2 (58). P. 94–109. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-2-94-109. (In Russ.).

13. Erokhin V. V., Sadykov Zh. B., Blinkov S. D. Vliyaniye topologii obshchego vyvoda na AChKh integral'nogo SVCh LC-fil'tra [Ground conductor layout influence on integrated microwave LC-filter AFCS] // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 57–64. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-2-57-64. (In Russ.).

14. Ruehli A. E., Antonini G., Jiang L. Skin-Effect Model for Round Wires in PEEC. International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE. 2012. P. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396927. (In Engl.).

15. Chan R.-J., Guo J.-C. Analysis and Modeling of Skin and Proximity Effects for Millimeter-Wave Inductors Design in Nanoscale Si CMOS // 9th European Microwave Integrated Circuit Conference. 2014. P. 13–16. DOI: 10.1109/EuMIC.2014.6997779. (In Engl.).

16. Koutsoyannopoulos Y. K., Papananos Y. Systematic Analysis and Modeling of Integrated Inductors and Transformers in RF IC Design // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. 2000. Vol. 47, Issue 8. P. 699–713. DOI: 10.1109/82.861403. (In Engl.).

17. Chen J., Liou J. J. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview // Journal of Semiconductor Technology and Science. 2004. P. 149–167. (In Engl.).

18. Shaltout A. H., Gregori S. Optimizing the Inductance Time-Constant Ratio of Polygonal Integrated Inductors // IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). 2018. P. 448–451. DOI: 10.1109/MWSCAS.2018.8623945. (In Engl.).

19. Hsu H.-M., Chang J.-Z., Chien H.-C. Coupling Effect of On-Chip Inductor With Variable Metal Width // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2007. Vol. 17, Issue 7. P. 498–500. DOI: 10.1109/LMWC.2007.899306. (In Engl.).

20. Elsaadi M., Tayel M. B., Steenson D. P. An Empirical Formula of Fringing Field Capacitance for MEMS Tunable Capacitor Actuators // IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic

Control and Computer Engineering MI-STA. 2021. P. 674–678. DOI:10.1109/MI-STA52233.2021.9464509. (In Engl.).

21. Goni A., del Pino J., Gonzalez B. [et al.]. An Analytical Model of Electric Substrate Losses for Planar Spiral Inductors on Silicon // IEEE Transactions on Electron Devices. 2007. Vol. 54, Issue 3. P. 546–553. DOI: 10.1109/TED.2006.890366. (In Engl.).

22. Sathyasree J., Vanukuru V., Nair D. R. [et al.]. A Substrate Model for On-Chip Tapered Spiral Inductors With Forward and Reverse Excitations // IEEE Transactions on Electron Devices. 2019. Vol. 66, Issue 1. P. 4. DOI: 10.1109/TED.2018.2873796. (In Engl.).

23. Zaal R. Spravochnik po raschetu fil'trov [Handbook of filter design]: trans from Germ. Moscow, 1983. 752 p. (In Russ.).

24. Khanzel G. E. Spravochnik po raschetu fil'trov [Handbook of filter design]: trans from Engl. / ed by A. E. Znamenskogo. Moscow, 1974. 288 p. (In Russ.).

25. Tatur T. A. Osnovy teorii elektricheskikh tsepey [Fundamentals of the electrical circuits theory]. Moscow, 1980. 271 p. (In Russ.).

26. Erokhin V. V., Zav'yalov S. A. Avtomatizirovanny sintez topologii SVCh integral'nykh vysokoizbiratel'nykh LC-fil'trov s minimizatsiyey poter' v polose propuskaniya: programma dlya EVM [Automated synthesis of microwave topologies of integrated highly selective LC filters with minimisation of losses in the passband: computer program]. Moscow, 2023. No. 2023660979. (In Russ.).

27. Ahyoune S., Lypez-Villegas J., Sieiro J. [et al.]. Effects of Shielding Structures on the Performance of Planar Inductors // Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS). 2016. DOI: 10.1109/DCIS.2016.7845353. (In Engl.).

28. Ali M. H. M., Ler C.-L., Rustagi S. C. [et al.]. The Impact of Electromagnetic Coupling of Guard Ring Metal Lines on the Performance of On-chip Spiral Inductor in Silicon CMOS // 2nd Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED). 2010. P. 285–288. DOI: 10.1109/ASQED.2010.5548257. (In Engl.).

29. Kojima K., Ohguro T., Momose H. S. [et al.]. Guard-ring design for high-performance RF CMOS // International Conference on Solid State Devices and Materials. 2002. P. 400–401. DOI: 10.7567/SSDM.2002.P2-9. (In Engl.).

30. Pun A., Yeung T., Lau J. [et al.]. Experimental Results and Simulation of Substrate Noise Coupling via Planar Spiral Inductor in RF ICs // International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest. 1997. P. 325–328. DOI: 10.1109/IEDM.1997.650393. (In Engl.).

EROKHIN Viktor Valerievich, Graduate Student of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, Research Scientist of «Systems on Chip» Research Laboratory, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 4231-2673

AuthorID (RSCI): 918830

Correspondence address: viktor_erohin@mail.ru

ZAVYALOV Sergey Anatolyevich, Associate Professor of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, Senior Research of «Systems on Chip» Research Laboratory, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: zavyalov62@mail.ru

For citations

Erokhin V. V., Zavyalov S. A. Automated synthesis of integrated microwave LC-filters layouts with passband losses minimization // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 152–161. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-152-161.

Received April 13, 2023.

© V. V. Erokhin, S. A. Zavyalov



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ В ЗАКРЫТОМ ОБЪЕМЕ

В статье представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию параметров газовой среды при горении древесины, резины и пластика в условиях, исключающих доступ кислорода в область реакции. Для создания условий был разработан лабораторный стенд. Получены графики изменения температуры и снижения светопропускания продуктов горения, скапливающихся в верхней части слоя камеры сгорания. Проанализированы изменения контролируемых параметров и получены корреляционные зависимости между ними. Полученные результаты могут быть использованы в качестве оценочных для построения прогнозных моделей развития пожаров в закрытых помещениях складского назначения, а также для оценки пожарной опасности веществ при горении в закрытом объеме.

Ключевые слова: горение, закрытые помещения, закрытый объем, пожарная опасность веществ, методы контроля.

Введение. Исследования в области пожарной безопасности предполагают получение расширенного представления об опасности горения веществ, материалов в различных условиях. Горение представляет собой сложный процесс, который зависит от условий и состава горючего вещества. Одним из факторов, влияющих на процесс горения, является доступ кислорода в зону горения. Целью настоящей работы является изучение кинетики горения и параметров газовой среды, образующейся в результате реакции окисления веществ в закрытом объеме. Будут рассмотрены условия проведения экспериментов, интерпретированы результаты, проведен сравнительный анализ контролируемых параметров исследуемых веществ.

На основе полученных данных и проведенных ранее исследований удастся расширить теоретическое понимание горения веществ в закрытом объеме, то есть в условиях, исключающих доступ воздуха.

Теория. Горение — физико-химический процесс, сопровождающийся выделением тепла, света и продуктов горения. Характер процесса горения может изменяться в зависимости от наличия либо отсутствия кислорода. Так, пожары, протекающие в открытой среде или в помещении с постоянным доступом воздуха, считаются регулируемыми пожарной нагрузкой [1]. Горение продолжается при избытке кислорода и зависит от количества топлива. Тогда как в условиях недостатка кислорода процесс горения отличен и зависит от окислителя. Такие пожары считаются регулируемыми вентиляцией [1] и протекают в условиях закрытой термодинамической системы, предполагающей отсутствие обмена воздуха и энергии с окружающей средой.

Пожары в закрытых объемах характеризуются следующими особенностями:

1. Повышение температуры газовой среды. Большая часть тепла аккумулируется внутри закрытого объема, так как отсутствует обмен энергией с окружающей средой.

2. Горение материалов внутри помещения при пожарах, регулируемых вентиляцией, считается неполным и сопровождается выделением большого количества СО и других пожароопасных продуктов неполного сгорания.

3. Повышение давления в связи с отсутствием возможности выхода продуктов горения за пределы помещения и высокой температуры, что может привести к разрушению и дальнейшему интенсивному распространению пожара.

4. Пониженная концентрация кислорода является ключевым фактором, определяющим характер горения в закрытом объеме.

Изучением процессов горения в закрытых пространствах занимается относительно небольшое число отечественных ученых. Изменение давления газовой среды внутри герметичного (закрытого) объема является перспективным в оценке параметров развития пожаров [2, 3]. В работах отечественных исследователей путем математических вычислений была выявлена корреляция между максимальной скоростью нарастания давления внутри отсека и такими параметрами, как площадь горения (удельная тепловая мощность) и продолжительность свободного развития пожара [4], массовой скоростью горения [5] и др. Выявленные зависимости характерны для полностью герметичных отсеков, тогда как, утверждает сам автор, остается неясным, каким образом осуществлять контроль изменения

давления для негерметичных отсеков, которыми являются в том числе и помещения.

Экспериментальными исследованиями характера горения веществ в закрытом пространстве преимущественно занимались зарубежные ученые [6, 7]. Zhang и др. [8], проводились исследования горения жидкости в бассейне в закрытом пространстве и измерялись параметры: массовая скорость сгорания, температура газа, концентрация кислорода, коэффициент светопропускания на разных уровнях и выявлены характерные особенности слоев внутреннего объема. В [9] проведены исследования в герметичной камере с метанолом в качестве источника возгорания, для изучения влияния давления и концентрации кислорода. И было обнаружено, что массовая скорость горения снижается с уменьшением концентрации кислорода. В работе [10] проведен теоретический анализ и экспериментально обоснована динамика заполнения закрытого отсека дымом. Другие исследователи преследовали специальные цели по изменению размеров отсеков или изучению горения на специализированных объектах, преимущественно с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями. Тогда как пожарную нагрузку помещений составляют природные или комбинированные твердые вещества и материалы.

Исследователями подтверждается факт, что изучению характера горения в условиях недостатка кислорода должны подвергаться такие виды топлива, которые встречаются в повседневной жизни [11], что позволит оценить опасность обращающихся или хранящихся веществ в закрытых помещениях складского назначения. Для чего разработан лабораторный стенд, позволяющий проводить исследование характера горения твердых веществ в закрытом объеме.

Лабораторное оборудование. Для проведения экспериментов был разработан лабораторный стенд (рис. 1), представляющий собой металлический короб (1) размерами 0,5 м×0,5 м×0,5 м, с установленными внутри приборами контроля параметров газовой среды. Внутренняя отделка камеры выполнена негорючими вермикулитовыми плитами толщиной 20 мм для ограничения теплообмена с окружающей средой. Конструкция короба выполнена таким образом, чтобы ограничить доступ кислорода в зону реакции горения. Разработанный стенд позволяет контролировать следующие параметры: температуру газовой среды в верхней части короба, общеобъемную концентрацию кислорода, потерю массы испытываемого образца и снижение светопропускания. Для контроля температуры использовались 4 термопары в верхней части камеры (4). Для контроля общеобъемной концентрации кислорода использовался газоанализатор (9). Снижение светопропускания продуктов горения регистрировалось при помощи источника лазерного излучения (3), проходящего через смотровое окно камеры. Электронные лабораторные весы (8) позволяли фиксировать изменение массы испытываемых образцов до и после экспериментов.

Объекты исследования. В рамках настоящего исследования объектом является горючая нагрузка помещений складского назначения. Число таких помещений ежегодно растет, также в них могут быть созданы условия для развития горения без доступа кислорода. Причиной роста таких объектов служит технологический прогресс и развитие различных видов торговли, что предполагает хранение готовой продукции или сырья в больших объемах. Отсюда

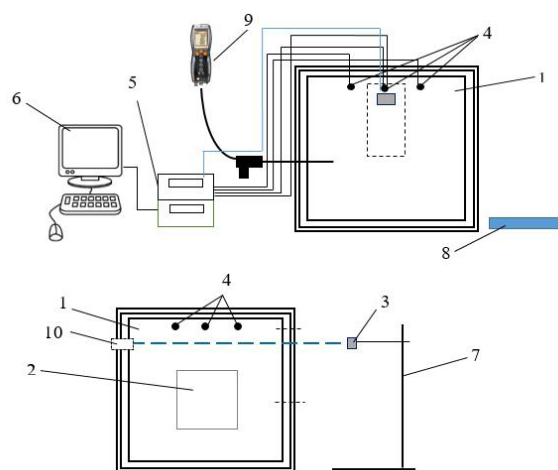


Рис. 1. Схема лабораторного стенда по исследованию процессов горения в закрытом объеме: 1 — испытательная камера; 2 — смотровое окно; 3 — источник излучения; 4 — термопары; 5 — приемно-контрольное устройство; 6 — ПК; 7 — штатив лабораторный; 8 — устройство для измерения массы; 9 — прибор для измерения концентрации кислорода; 10 — приемник излучения

и характерная особенность таких помещений — обращение разнообразных веществ и материалов. К сожалению, число пожаров на таких объектах ежегодно растет, что приносит не только ущерб обществу и государству, но также огромный материальный ущерб и вред окружающей среде [12]. В качестве исследуемых объектов были выбраны следующие материалы, составляющие основной объем пожарной нагрузки в помещениях складского назначения:

1. Резинотехническое изделие — тепло-морозостойкая (далее — ТМКЩ) резина черного цвета [13].

Резинотехнические изделия являются расходным материалом для производства различных деталей (прокладочные, амортизирующие, уплотнительные), элементов (гибкие, транспортные ленты), трубопроводов, товаров общего пользования и т.д. Помимо широкого применения в качестве обоснования выбора объекта исследования явился резонансный пожар, произошедший в г. Красноярске в 2020 году на складе автозапчастей, где также осуществлялось хранение резинотехнических изделий [14].

2. Хвойная древесина.

Хвойная древесина используется во многих областях, включая строительство, производство мебели, бумаги и других изделий. Состав хвойной древесины, соответственно и параметры горения, могут варьироваться в зависимости от вида дерева и даже места произрастания.

3. Пластик (а конкретно, акрилонитрилбутадиенстирол, далее — АБС) — широкое применение в качестве расходного материала конструктивного исполнения бытовой техники. Способен гореть в воздухе.

Для исследования были подготовлены 15 образцов резины, 15 образцов древесины и 9 образцов пластика. Размеры образцов составили 10×2 см, толщина реальная, но не более 1 см. Образцы помещались в держатель, поджигались, и после достижения развившегося горения дверца камеры закрывалась. Предварительная подготовка не осуществлялась,

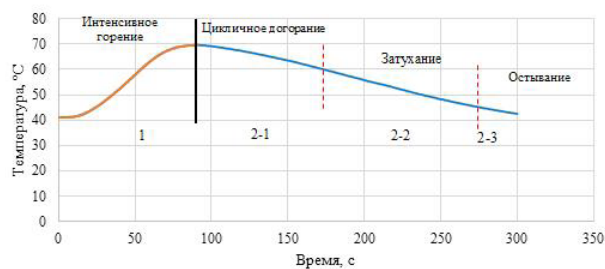


Рис. 2. Диаграмма изменения температуры при горении древесины в течение времени эксперимента

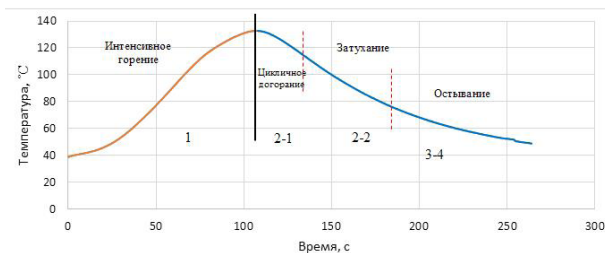


Рис. 3. Диаграмма изменения температуры при горении резины в закрытом объеме в течение времени эксперимента

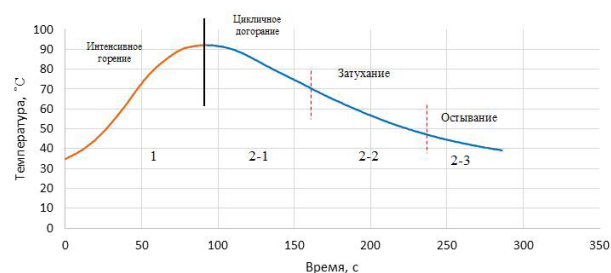


Рис. 4. Диаграмма изменения температуры при горении пластика в закрытом объеме в течение времени эксперимента

образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 ч.

Результаты исследований. На рис. 2–4 представлены диаграммы изменения температуры в течение времени эксперимента для хвойной древесины, резины, пластика. Динамика изменения температуры разделена на 2 этапа. 1 этап — интенсивное горение, второй этап состоит из 3 стадий: 2–1 — «циклическое догорание», 2–2 — затухание и 2–3 — остывание до комнатной температуры. Интенсивное горение характеризуется высокой скоростью горения и нарастанием температуры газовой смеси верхнего слоя камеры до максимального значения. Реакция горения является экзотермической. После достижения максимальной температуры начинается вторая стадия с «циклического» догорания (2–1). Наступает данный этап по причине того, что в точке горения достигается предельное содержание кислорода, необходимого для горения вещества. Поэтому из внутреннего объема камеры начинается потребление кислорода, что соответствует показаниям газоанализатора, горение происходит циклично. Пламя «дышит», практически гаснет и разгорается вновь с поступлением порции кислорода. Данный этап характеризуется эндотермическими процессами, снижением скорости горения.

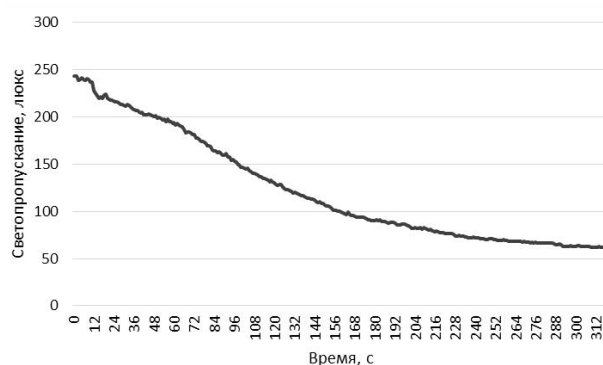


Рис. 5. Снижение светопропускания продуктов горения при исследовании древесины в закрытом объеме

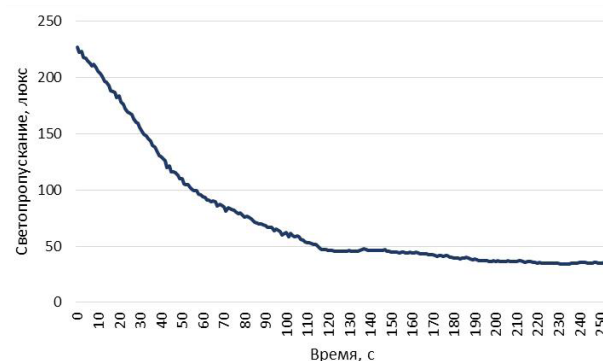


Рис. 6. Снижение светопропускания продуктов горения при исследовании резины в закрытом объеме

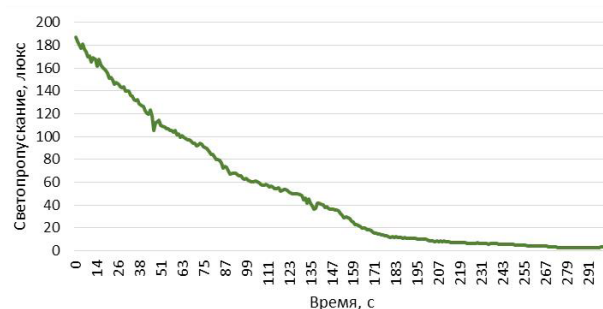


Рис. 7. Снижение светопропускания продуктов горения при исследовании пластика в закрытом объеме

В результате энергии становится недостаточно для поддержания горения и пламя гаснет (наступает этап затухания — 2–2). Так как на рис. 1–3 приведены среднеарифметические значения, соответственно, диапазон стадии затухания — широкий. После затухания испытываемое вещество остывает до комнатной температуры.

Как видно из представленных графиков, характер горения веществ отличается друг от друга: разные максимальные температуры, время наступления стадий и прекращения горения. Поэтому обобщить параметры температур не представляется возможным для всех веществ, что подтверждает необходимость анализа динамики горения веществ в закрытом объеме.

Во время эксперимента регистрировалось снижение светопропускания при использовании лазера, результаты среднеарифметических значений представлены на рис. 5–7. Как видно из представ-

Таблица 1

Скорости снижения светопропускания при горении твердых веществ в закрытом объеме

№ п/п	Вещество	1-я стадия	2-я стадия
1	Древесина	0,95	0,71
2	Резина	1,99	0,51
3	Пластик	1,28	0,67

Таблица 2

Корреляционная матрица параметров горения древесины с учетом увеличения площади образцов

	$m_{\text{сгор } 2}$	ΔT	ψ	ϑ_T	$\frac{\Delta E_9}{\Delta t}$
$m_{\text{сгор } 2}$	1				
ΔT	0,990	1			
ψ	0,910	0,951	1		
ϑ_T	0,876	0,867	0,703	1	
$\frac{\Delta E_9}{\Delta t}$	0,735	0,848	0,987	0,778	1

ленных графиков, снижение светопропускания, соответственно, и скорость выхода продуктов горения (заполнения верхнего проема продуктами горения) индивидуально для каждого из исследуемых веществ.

При горении пластика выделяется черный дым и светопропускание снижается практически до нуля (рис. 6). Но следует отметить, что цвет продуктов горения не определяет пожарную опасность веществ [1]. В табл. 1 представлены скорости снижения светопропускания газовой среды для исследуемых веществ. Большая часть продуктов горения выделяется на первой стадии, что подтверждается экспериментальными данными. Но для оценки пожароопасности образующейся газовой смеси необходимы дополнительные исследования.

Так как максимальное скопление и выделение продуктов горения наблюдается в первой стадии и газовая смесь нагрета до высоких температур, тогда можно предположить, что этап циклического горения, при котором наблюдается недостаток кислорода, может быть опасным в случае вскрытия проема и доступа кислорода из окружающей среды. В зависимости от концентрации горючих газов и температуры, нагретого слоя доступ кислорода приведет к ускорению скорости горения и может наступить воспламенение газовой смеси верхней части исследуемого объема или помещения.

Для выявления зависимостей между регистрируемыми и вычисляемыми параметрами, исследование твердых веществ проводилось в два этапа: увеличение массы образцов и увеличение площади. По результатам исследования изменения массы веществ при горении в закрытом объеме не было установлено зависимостей и изменений параметров. Увеличение площади, в свою очередь, приводило к увеличению значений, что позволило выявить зависимости по исследуемым параметрам. В результате экспериментов установлено, что ос-

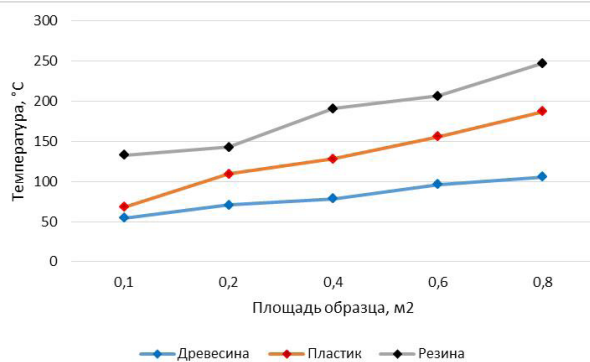


Рис. 8. Графики изменения максимальных температур газовой среды в зависимости от площади сгораемого вещества

Таблица 3

Функции изменения максимальных температур продуктов горения при изменении площади горения образцов

Вещество	Функция	Коэффициент детерминации, R^2
Резина	$y = 29,279x + 96,253$	0,964
Пластик	$y = 28,484x + 44,257$	0,9879
Древесина	$y = 12,931x + 42,28$	0,9883

новным параметром, определяющим массу потребленного кислорода, скорость прироста температуры, снижение светопропускания, является усредненная массовая скорость выгорания веществ. Корреляционная зависимость между исследуемыми параметрами на примере древесины представлена в табл. 2.

В табл. 2 представлена корреляционная зависимость следующих параметров:

- 1) масса сгоревшего кислорода $m_{\text{сгор } 2}$;
- 2) прирост температуры (ΔT);
- 3) усредненная массовая скорость выгорания (ψ);
- 4) скорость прироста температуры (ϑ_T);
- 5) снижение светопропускания $\left(\frac{\Delta E_9}{\Delta t}\right)$.

Далее на рис. 8 представлен сводный график максимальных температур газовой среды при изменении площади горения. Как видно из представленных данных, при горении резины образующаяся газовая среда нагревается до больших температур, нежели древесина или пластик. Нагретая до высоких температур газовая среда с достаточной концентрацией продуктов неполного сгорания может воспламениться в случае внезапного доступа кислорода, что приведет к дефлагационному горению газозадушной смеси. Построенные графики были аппроксимированы и получены уравнения с достаточно высокими коэффициентами детерминации. Полученные уравнения представлены в табл. 3 и позволяют прогнозировать ожидаемую температуру газовой смеси в зависимости от предполагаемой площади сгораемого вещества в исследуемом объеме.

Обсуждение результатов. Сравнение полученных результатов с другими исследованиями. Как

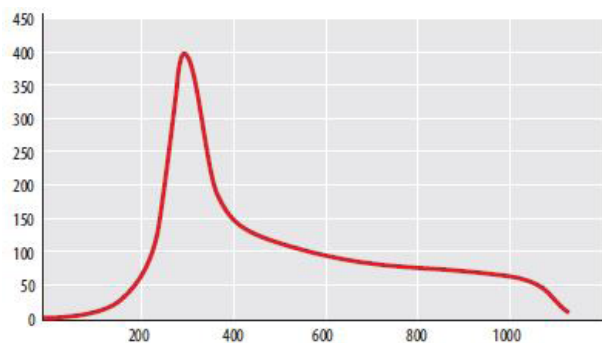


Рис. 9. График зависимости температуры от времени в закрытом помещении [16]

было выявлено в ходе проведенных исследований, массовая скорость выгорания является определяющим параметром в динамике горения, что подтверждается математическими исследованиями [5]. Описанный процесс развития и прекращения горения в настоящей статье экспериментально подтвержден и соответствует положениям, изложенным в [8, 15]. Представленные графики изменения температуры визуально повторяют график (рис. 9), представленный в [16].

Значения температур варьируются в зависимости от используемого топлива. Для конкретного вещества будут свои критические значения температур, что приводит к сложности обобщения температуры, необходимой, например, для возникновения явления обратной тяги.

Обратная тяга — дефлаграционное горение газовой смеси, образующееся при вскрытии проемов помещений, где развивалось горение в условиях, исключающих доступ кислорода. Ряд исследований данного явления представлен в работах [11, 17] и др. Поэтому актуально исследовать кинетику горения, что позволит определить параметры, обобщающие опасность горения веществ в закрытом объеме.

Ограничение проведенного исследования. Полученные зависимости и значения, в первую очередь, определяются объемом (лабораторный стенд), в котором были проведены эксперименты. Результаты лабораторных испытаний могут быть использованы в качестве оценочных для моделирования или прогнозирования пожаров в больших объемах. В реальности пожар представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от множества факторов.

Закключение. В данной статье были получены результаты исследования горения твердых веществ в закрытом объеме. Были проведены эксперименты с древесиной, резиной, пластиком; проанализированы контролируемые параметры. Был выявлен опасный диапазон с точки зрения развития дальнейшего развития пожара. Подтверждено, что доступ кислорода и усредненная массовая скорость выгорания являются основными факторами, влияющими на кинетику реакции горения в закрытом объеме.

Проведенное исследование имеет практическое применение для обеспечения пожарной безопасности на объектах складского назначения. В дальнейших исследованиях предполагается обосновать критерии, определяющие опасность горения материалов в условиях закрытого объема.

Библиографический список

1. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. NFPA, 2004. 262 p.
2. Никитин Е. В. К вопросу о приближенной оценке площади горения в герметичном отсеке корабля // Надежность и живучесть технических средств корабля: межвуз. науч.-техн. сб. Севастополь: СВВМИУ, 1988. С. 101–106.
3. Nikitin Y. V. Indirect method of estimating a fire pool area in a closed compartment // Journal of fire sciences. 1999. Vol. 17, no. 1. P. 57–70. DOI: 10.1177/073490419901700104.
4. Никитин Е. В., Кириченко А. В., Сошкин П. А. Исследование динамики выравнивания воздушного давления в замкнутой системе отсеков для оценки параметров развития пожара // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 3 (97). С. 37–50. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.37-50.
5. Nikitin Y. V. Variations of mass combustion rate with oxygen concentration and gas pressure of a milieu // Journal of Fire Sciences. 1998. Vol. 16, no. 6. P. 458–467. DOI: 10.1177/073490419801600605.
6. Tatem P. A., Williams F. W., Ndubizu C. C. [et al.]. Influence of Complete Enclosure on Liquid Pool Fires // Combustion Science and Technology. 1986. Vol. 45, no. 3–4. P. 185–198. DOI: 10.1080/00102208608923849.
7. Chow W. Studies on Closed Chamber Fires // Journal of Fire Sciences. 1995. Vol. 13, no. 2. P. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201.
8. Zhang J., Lu S., Li Q. [et al.]. Impacts of Elevation on Pool Fire Behavior in a Closed Compartment: A Study Based upon a Distinct Stratification Phenomenon // Journal of Fire Sciences. 2013. Vol. 31, no. 2. P. 173–188. DOI: 10.1177/0734904112460203.
9. Bailey J., Williams F. W., Tatem P. A. Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration. Naval Research Laboratory, 1993. 55 p.
10. Zhang J., Lu S. X., Li Q. [et al.]. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources // Fire Safety Journal. 2012. Vol. 54. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.003.
11. Wu C. L. Experimental study of backdraught using solid fuels. 2019. 244 p.
12. Хуртина Е. Ю., Мухаметшина Я. М., Нечаева О. А. Влияние вредных веществ на атмосферу в результате горения нефтепродуктов на складе ГСМ // Наука, образование и инновации: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Саратов 13 мая 2016 г. Саратов: МЦИИ «ОМЕГА САЙНС». 2016. Ч. 4. С. 18–21. EDN: VYAYMD.
13. ГОСТ 7338-90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия. Введ. 1991–07–01. Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. 18 с.
14. Сетевое издание «NGS24.RU» Красноярск онлайн. URL: <https://ngs24.ru/text/incidents/2021/02/04/69749223> (дата обращения: 12.06.2023).
15. Loo A. S. X., Coppalle A., Aîné P. Flame extinction in a ventilation-controlled compartment // Procedia Engineering. 2013. Vol. 62. P. 301–308. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.068.
16. Bengtsson L. G. Enclosure fires. Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2001. 192 p.
17. Fleischmann C. M., Pagni P. J., Williamson R. B. Exploratory backdraft experiments // Fire Technology. 1993. Vol. 29, no. 4. P. 298–316. DOI: 10.1007/BF01052526.

МАКАРОВА Татьяна Петровна, адъюнкт факультета заочного и дистанционного обучения Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 9125-5587

AuthorID (РИНЦ): 1120146

Адрес для переписки: tattomakarova@yandex.ru

БАТУРО Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заместитель начальника академии по научной работе — начальник научно-

технического центра Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 6887-7568

AuthorID (РИНЦ): 814934

Адрес для переписки: batur@ibpsa.ru

БЕЗБОРОДОВ Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела научно-технического центра Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, г. Железногорск.

SPIN-код: 5195-4507

AuthorID (РИНЦ): 271274

Для цитирования

Макарова Т. П., Батуро А. Н., Безбородов Ю. Н. Результаты исследования горения твердых веществ в закрытом объеме // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 162–168. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-162-168.

Статья поступила в редакцию 30.06.2023 г.

© Т. П. Макарова, А. Н. Батуро, Ю. Н. Безбородов

UDC 544.452

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-162-168

EDN: PXNKIQ

**T. P. MAKAROVA
A. N. BATURO
YU. N. BEZBORODOV**

**Siberian Fire and Rescue
Academy of the State Fire Service
of the EMERCOM of Russia,
Zheleznogorsk, Russia**

RESULTS OF A STUDY ON COMBUSTION OF SOLIDS IN AN ENCLOSED VOLUME

The paper presents the results of laboratory experiments to study the parameters of the gas environment during the combustion of wood, rubber and plastic under conditions that exclude oxygen access to the reaction area. A laboratory bench has been developed to create the conditions. Graphs of temperature changes and reduction of light transmission of combustion products accumulated in the upper part of the combustion chamber layer have been obtained. Changes of the controlled parameters are analysed and correlation dependences between them are obtained. The results obtained can be used as estimates for building prediction models of fire development in enclosed storage rooms, as well as for assessing the fire hazard of substances when burning in an enclosed volume.

Keywords: combustion, enclosed spaces, enclosed volume, fire hazard of substances, control methods.

References

1. NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. NFPA, 2004. 262 p. (In Engl.).
2. Nikitin E. V. K voprosu o priblizhennoy otsenke ploshchadi gorennya v germetichnom otseke korablya [On the issue of approximate assessment of the combustion area in a sealed compartment of a ship] // Nadezhnost' i Zhivuchest' Tekhnicheskikh Sredstv Korablya. *Reliability and Survivability of the Ship's Technical Equipment*. Sevastopol, 1988. P. 101–106. (In Russ.).
3. Nikitin Y. V. Indirect method of estimating a fire pool area in a closed compartment // *Journal of Fire Sciences*. 1999. Vol. 17, no. 1. P. 57–70. DOI: 10.1177/073490419901700104. (In Engl.).
4. Nikitin Y. V., Kirichenko A. V., Soshkin P. A. Issledovaniye dinamiki vyravnivaniya vozdušnogo davleniya v zamknutoy sisteme otsekov dlya otsenki parametrov razvitiya pozhara [Investigation of the dynamics of air pressure equalization in a closed compartment system for assessing parameters of a fire

development] // *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti. Technologies of Technosphere Safety*. 2022. No. 3 (97). P. 37–50. DOI: 10.25257/TTS.2022.3.97.37-50. (In Russ.).

5. Nikitin Y. V. Variations of mass combustion rate with oxygen concentration and gas pressure of a milieu // *Journal of Fire Sciences*. 1998. Vol. 16, no. 6. P. 458–467. DOI: 10.1177/073490419801600605. (In Engl.).

6. Tatem P. A., Williams F. W., Ndubizu C. C. [et al.]. Influence of Complete Enclosure on Liquid Pool Fires // *Combustion Science and Technology*. 1986. Vol. 45, no. 3–4. P. 185–198. DOI: 10.1080/00102208608923849. (In Engl.).

7. Chow W. Studies on Closed Chamber Fires // *Journal of Fire Sciences*. 1995. Vol. 13, no. 2. P. 89–103. DOI: 10.1177/073490419501300201. (In Engl.).

8. Zhang J., Lu S., Li Q. [et al.]. Impacts of Elevation on Pool Fire Behavior in a Closed Compartment: A Study Based upon a Distinct Stratification Phenomenon // *Journal of Fire Sciences*. 2013. Vol. 31, no. 2. P. 173–188. DOI: 10.1177/0734904112460203. (In Engl.).

9. Bailey J., Williams F. W., Tatem P. A. Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration. Naval Research Laboratory, 1993. 55 p. (In Engl.).
10. Zhang J., Lu S. X., Li Q. [et al.]. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources // *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 54. P. 14–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.003. (In Engl.).
11. Wu C. L. Experimental study of backdraught using solid fuels. 2019. 244 p. (In Engl.).
12. Hurtina E. Y., Muhametshina Y. M., Nechaeva O. A. Vliyaniye vrednykh veshchestv na atmosferu v rezul'tate goreniya nefteproduktov na sklade GSM [The influence of harmful substances on the atmosphere as a result of the combustion of petroleum products in a fuel and lubricants warehouse] // *Nauka, Obrazovaniye i Innovatsii. Science, Education and Innovation*. 2016. No. 4. P. 18–21. EDN: VYAYMD. (In Russ.).
13. GOST 7338-90. Plastiny rezinovyie i rezinotkanevyye. Tekhnicheskiye usloviya [Rubber and rubber-fabric sheets. Specifications]. Moscow, 2004. 18 p.
14. Setevoye izdaniye «NGS24.RU» Krasnoyarsk onlayn [Network publication «NGS24.RU» Krasnoyarsk online]. URL: <https://ngs24.ru/text/incidents/2021/02/04/69749223> (accessed: 12.06.2023). (In Russ.).
15. Loo A. S. X., Coppalle A., Aîné P. Flame extinction in a ventilation-controlled compartment // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 62. P. 301–308. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.068. (In Engl.).
16. Bengtsson L. G. Enclosure fires. Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2001. 192 p. (In Engl.).
17. Fleischmann C. M., Pagni P. J., Williamson R. B. Exploratory backdraft experiments // *Fire Technology*. 1993. Vol. 29, no. 4. P. 298–316. DOI: 10.1007/BF01052526. (In Engl.).

MAKAROVA Tatiana Petrovna, Adjunct of Correspondence and Distance Learning Faculty, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk. SPIN-code: 9125-5587
AuthorID (RSCI): 1120146
Correspondence address: tattomakarova@yandex.ru
BATURO Aleksey Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Academy for Scientific Work – Head of the Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk. SPIN-code: 6887-7568
AuthorID (RSCI): 814934
Correspondence address: batur@ibpsa.ru
BEZBORODOV Yury Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of Research Department of the Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk. SPIN-code: 5195-4507
AuthorID (RSCI): 271274

For citations

Makarova T. P., Baturo A. N., Bezborodov Yu. N. Results of a study on combustion of solids in an enclosed volume // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 162–168. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-162-168.

Received June 30, 2023.

© T. P. Makarova, A. N. Baturo, Yu. N. Bezborodov

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