

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

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НАУЧНЫЙ

2023

№ 3 (187)

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОНИКА,
ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ



ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК

Издается с октября 1997 г.
Выходит 4 раза в год

№ 3 (187) 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 20.09.2023 г.
Дата выхода в свет 29.09.2023 г.

Формат 60x84 1/8. 17,21 усл. печ. л.
Бумага офсетная

Отпечатано на дупликаторе
отдела научной информации ОмГТУ

Тираж 500 экз.
(1-й завод 1–100). Заказ 137
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

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

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

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

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

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,
Нижевартовский государственный университет, г. Нижневартовск

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

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

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

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, к. т. н., 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

№ 3 (187) 2023

FOUNDER

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

Federal State Budgetary
Educational Institution
of Higher Education «Omsk State
TransportUniversity»

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

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

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

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

Executive Secretary
M. F. Fedorchuk

Editor
T. P. Semina

Computer Page-Proofs
O. N. Chirun

Cover Layout
V. S. Gurinov

© Editorial Board of
«Omsk Scientific Bulletin»,
OmSTU

Signed in Print 20.09.2023
Date of Publication 29.09.2023

Format 60x84 1/8.
Conventional
Printed Sheets 17,21
Offset Paper

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

Circulation 500 Copies.
(The 1st Printing Factory 1–100).
Order 137
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

М. А. Мукутадзе, Х. Н. Абдулрахман, В. Е. Шведова, Г. А. Бадахов, Н. В. Зиновьев. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала	5
В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев, К. О. Серяков. Исследование динамики механической системы с нелинейным упругим подвесом и спектральный анализ результатов	15
К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова, Е. В. Любчинов. Циклические поверхности, сопровождающие нелинейчатые квадратики вращения	23
Д. В. Казаков, Н. А. Гуржи, Н. Э. Курдагия. Разработка алгоритма и структуры программного обеспечения для диагностирования мобильных энергетических средств	30
Н. Г. Макаренко, Ю. С. Яковлева, О. А. Михалевич. Способы повышения долговечности машин и механизмов	39
Д. С. Макашин. Анализ силы резания при фрезеровании закаленной стали	45
А. Х. Шамутдинов, И. Ю. Лесняк. Анализ кинематических пар катания типа «цилиндр в цилиндре»	52
М. О. Шальнев, Я. В. Денисова. Применение методов бережливого производства для улучшения управления производственными процессами на химическом предприятии	60

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Б. В. Лукутин, М. М. Попов. Повышение технико-экономической эффективности инверторной микрогидроэлектростанции деривационного типа	68
А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин, Д. А. Титанаков. Стенд для проведения приемо-сдаточных испытаний асинхронных электрических машин методом взаимной нагрузки	77
О. А. Лысенко. Имитационное моделирование асинхронного частотно-регулируемого электропривода с учетом влияния гидравлической нагрузки центробежного насоса	84
В. А. Шабанов, А. В. Сорокин. Использование модулей фазных напряжений для выбора поврежденной фазы при замыканиях на землю	92
Е. В. Петрова. Аналитический метод расчета потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом изменения нагрузки и погодных условий	101
А. В. Прудий, Ю. М. Ляшенко. Результаты кинестатического исследования дорожной энергетической установки с ползунно-коромысловым преобразователем	109

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

В. И. Глухов, А. Г. Варепо. Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей. Часть I. Теория двух размеров максимума и минимума	116
А. А. Кузнецов, Н. В. Волкова, К. И. Фомиченко, Д. М. Коршунов. Повышение точности определения продуктов коррозии в железобетонных конструкциях методом атомно-эмиссионного спектрального анализа	125
А. Б. Ионов, Н. С. Чернышева, Б. П. Ионов, М. А. Рябова. Оценка влияния атмосферного водяного пара на результаты бесконтактного измерения температуры	131
М. Н. Лютикова, С. В. Нехорошев, В. М. Муратова, П. Р. Семенюк, А. С. Гаджиева. О целесообразности контроля содержания фенольных соединений в трансформаторном масле	140

CONTENTS

MECHANICAL

M. A. Mukutadze, H. N. Abdulrahman, V. E. Shvedova, G. A. Badakhov, N. V. Zinoviev. Studies on wear resistance of the radial bearing design taking into account rheological properties of micropolar lubricant	5
V. A. Nekhaev, V. A. Nikolaev, A. N. Smalev, K. O. Seryakov. Dynamics of a mechanical system with nonlinear elastic suspension and spectral analysis of the results	15
K. L. Panchuk, T. M. Myasoedova, E. V. Lyubchinov. Cyclic surfaces accompanying non-ruled quadrics of rotation	23
D. V. Kazakov, N. L. Gurzhi, N. E. Kurdagia. Development of the algorithm and structure of software for diagnostics of mobile power facilities	30
N. G. Makarenko, Yu. S. Yakovleva, O. A. Mikhalevich. Ways to increase the durability of machines and mechanisms	39
D. S. Makashin. The analysis of cutting forces for hardened steel milling	45
A. Kh. Shamutdinov, I. Yu. Lesnyak. The analysis of kinematic rolling pairs such as «cylinder in cylinder»	52
M. O. Shalnev, Ya. V. Denisova. Applying lean manufacturing practices to improve process control in a chemical plant	60

ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

B. V. Lukutin, M. M. Popov. Improving the technical and economic efficiency of a derivation-type inverter of micro hydro power plant	68
A. V. Bublik, V. V. Bublik, N. V. Yesin, D. A. Titanakov. The stand for conducting acceptance tests of asynchronous electric machines by method of mutual loading	77
O. A. Lysenko. Determination of the influence of hydraulic load of centrifugal pump on coordinates of asynchronous frequency-controlled electric drive	84
V. A. Shabanov, A. V. Sorokin. The use of phase voltage modules to select the damaged phase in case of single-phase earth faults	92
E. V. Petrova. Analytical method for calculating losses in overhead lines of electric power systems taking into account changes in load and weather conditions	101
A. V. Prudiy, Yu. M. Lyashenko. Results of kinetostatic research of road energy harvesting system with slider-rocker mechanism	109

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

V. I. Glukhov, L. G. Varepo. Unified reference system for geometric characteristics dimensional elements of details. Part I. The theory of two dimensions maximum and minimum	116
A. A. Kuznetsov, N. V. Volkova, K. I. Fomichenko, D. M. Korshunov. Improving the accuracy of determining corrosion products in reinforced concrete structures by atomic emission spectrum analysis	125
A. B. Ionov, N. S. Chernysheva, B. P. Ionov, M. A. Ryabova. Simulation of the effect of absorption by atmospheric water vapor on the results of non-contact temperature measurements	131
M. N. Lyutikova, S. V. Nekhoroshev, V. M. Muratova, P. R. Semenyuk, A. S. Gadzhiyeva. On the feasibility of monitoring the content of phenolic compounds in transformer oil	140

УДК 621.896+06
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14
EDN: IKFMSX

М. А. МУКУТАДЗЕ
Х. Н. АБДУЛРАХМАН
В. Е. ШВЕДОВА
Г. А. БАДАХОВ
Н. В. ЗИНОВЬЕВ

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

ИССЛЕДОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОПОЛЯРНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Статья посвящена разработке и анализу модели движения микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре радиального подшипника скольжения с фторопластсодержащим антифрикционным композиционным полимерным покрытием и с канавкой на опорной поверхности.

Новые модели получены на базе классических уравнений в приближении для «тонкого слоя» и уравнения неразрывности, описывающих турбулентный режим движения смазочного материала с микрополярными реологическими свойствами. Результаты проведенного численного анализа полученных моделей существующих эксплуатационных характеристик позволили получить количественную оценку эффективности опорного профиля с фторопластсодержащим антифрикционным композиционным полимерным покрытием с осевой канавкой.

Для завершения комплекса исследований и верификации теоретических разработок были выполнены экспериментальные исследования.

Новизна работы заключается в конкретизации методики инженерных расчетов конструкции эффективного радиального подшипника с антифрикционным полимерным покрытием с осевой канавкой на опорной поверхности подшипниковой втулки при учете зависимости реологических свойств микрополярного смазочного материала от давления и температуры в турбулентном режиме, позволяющей оценить величину основных эксплуатационных характеристик: гидродинамического давления, нагрузочной способности и коэффициента трения, а также расширить область практического применения моделей для инженерных расчетов.

Таким образом, конструкция радиального подшипника с полимерным покрытием опорного профиля, канавкой шириной 3 мм обеспечила стабиль-

ное всплывание вала на гидродинамическом клине, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований радиального подшипника диаметром 40 мм при скорости скольжения 0,3–3 м/с, нагрузке 4,9–24,5 МПа.

Ключевые слова: радиальный подшипник, исследование износостойкости, антифрикционное полимерное композиционное покрытие, канавка, верификация, турбулентный режим течения, зависимость вязкости от давления и температуры.

Введение. Для выполнения своих функций подшипники скольжения должны обладать высокими показателями теплостойкости, износостойкости и пределами выносливости материала подшипников скольжения. Условия работы гидродинамических опор скольжения зависят от скоростного и нагрузочного режимов эксплуатации, толщины смазочного слоя, температуры и давления в рабочем зазоре, расхода смазочного материала и коэффициента трения.

Применение современных высокотехнологичных смазочных материалов является ключевым фактором для снижения потерь на трение в сопряжениях и повышения энергоэффективности трибосистем в целом.

Задача расчета для тяжело нагруженных узлов трения основана на неклассической теории гидродинамического смазывания, описывающей поведение неньютоновских жидкостей в тонкой смазочной пленке, разделяющей поверхности трения трибосопряжения. Учитывая современные тенденции в производстве смазочных материалов и постоянный прогресс в области разработки противозносных и иных присадок, становится тяжелее разработать математические модели, описывающие поведение смазочных материалов на основе теории смазывания, опирающейся на реологическое поведение смазочного материала с учетом условия подачи смазочного материала, тепловых процессов, геометрии опорного узла и совокупности всех действующих нагрузок.

В исследовании М. Deligant и др. [1] предложена теоретическая модель, описывающая потери на трение в подшипниках скольжения. Полученные результаты практически совпали с итогами эксперимента, что позволяет прогнозировать величину потери трения. В результате расчета установлено, что охлаждение подшипника происходит за счет теплопроводности подшипника, крутящий момент не является линейной функцией скорости.

В работе [2] показано, что амплитуда прецессии ротора радиального подшипника скольжения в любом режиме составляет менее 11 микрон, что указывает на отсутствие прямого контакта между опорным кольцом и ротором.

Результаты исследования S. C. Sharma и др. [3] изменения вязкости с учетом тепловых явлений гибридного подшипника с прорезями показали, что коэффициенты подачи, жесткости и демпфирования, а также толщина смазочных материалов изменяются при учете тепловых эффектов.

В. Kucinshi и Filhon [4] представили исследование гидродинамического давления, распределения температур в подшипнике скольжения на границе раздела пленка/втулка, скорости потока жидкости, потерь мощности и толщины пленки жидкости. В результате установлено, что критическими параметрами для высоконагруженных подшипников, работающих на низкой скорости, являются толщи-

на пленки смазочного материала и максимальное давление; для высокоскоростных, работающих при малой нагрузке, — максимальная температура.

Р. Khatok и Н. С. Garg [5] проанализировали работу капиллярно-компенсированных гибридных подшипников с учетом тепловых эффектов и микрополярного смазочного материала. Установлено, что для получения более реальных характеристик необходим учет тепловых эффектов, так как значительное влияние на работу вышеуказанных подшипников оказывает увеличение температуры.

Результаты исследований [6–8] посвящены расчету характеристик устойчивости гидродинамических опор коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания с учетом параметров, характеризующих износостойкость, теплонапряженность и усталостную долговечность.

В работах [9–10] предложен метод тепловой диагностики, позволяющий определить функции фрикционного тепловыделения и момента трения по замерам температур. Установлено, что распределение температуры по длине вала и опоре однородно, а влияние теплоотдачи от их торцовых поверхностей незначительно и минимально. Необходимо описывать нестационарное температурное поле в рабочем зазоре двумерным уравнением теплопроводности.

Результаты исследования [11–18] посвящены разработке математических моделей тепловых процессов в подшипниках скольжения с учетом обобщения модели для одного подшипника. Для удобства инженерных расчетов формулы для нахождения температурного поля в подшипнике скольжения найдены с учетом предположения о постоянстве коэффициента разделения теплового потока на границе контакта между цапфой и втулкой.

Для определения поведения нового смазочного материала, установления коэффициента и силы трения, а также тепловой мощности, выделяемой в жидкости, в работах [19–20] разработана эластогидродинамическая теория смазывания, позволяющая более точно и универсально рассчитывать тепловыделение с учетом явлений, возникающих в смазочном слое.

В настоящее время при расчете тепловыделения также используются эмпирические зависимости [21–24] от геометрических параметров, условий эксплуатации и свойств применяемых смазочных материалов. Это обстоятельство подчеркивает важность разработки новых и повышения точности уже имеющихся расчетных моделей.

Целью исследования является установление зависимости реологических свойств смазочного материала радиального подшипника скольжения с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием поверхности подшипниковой втулки с канавкой от давления и температуры.

Постановка задачи. Задача включает рассмотрение турбулентного движения микрополярного

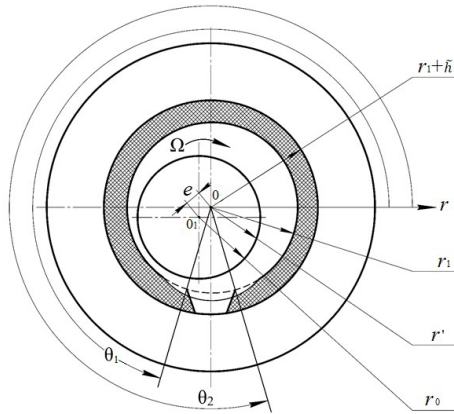


Рис. 1. Расчетная схема

несжимаемого смазочного материала в рабочем зазоре бесконечного радиального подшипника скольжения.

Вал вращается с угловой скоростью Ω , а подшипниковая втулка неподвижна. Предполагается, что пространство между эксцентрично расположенным валом и подшипником полностью заполнено смазочным материалом, а на подшипниковую втулку нанесено полимерное покрытие.

В полярной системе координат (рис. 1) с полюсом в центре подшипниковой втулки уравнение контура вала, втулки и ее поверхности с полимерным покрытием, имеющим осевую канавку, запишем в виде

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

где $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$.

Установлено, что вязкостные характеристики микрополярного смазочного материала зависят от давления и температуры по следующим законам [25]:

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha p' - \beta T'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\alpha'' p' - \beta'' T'}. \quad (2)$$

Исходными базовыми уравнениями с учетом (2) являются уравнение движения несжимаемой жидкости для «тонкого слоя» и уравнение неразрывности

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

Система уравнений (3) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \\ \text{при } r' &= r_i; \quad \theta_1 < \theta < \theta_2; \\ v_{\theta} &= 0, \quad v_{r'} = 0 \\ \text{при } r' &= r_1 - \tilde{h}; \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \\ &\text{и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\ v_{\theta} &= r_0 \Omega, \quad v'_{r'} = -\Omega e \sin \theta \end{aligned}$$

при $r' = r_0 + e \cos \theta$;

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

Для удобства решения применяем стандартную методику перехода к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned} r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0, \\ r' &= (r_1 - \tilde{h}) - \delta r, \\ \delta &= (r_1 - \tilde{h}) - r_0, \quad v_{\theta_i} = \Omega r_0 v_i; \\ v'_{r'_i} &= \Omega \delta u_i; \quad p' = p' p, \\ p' &= \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) \Omega r_0^2}{2\delta^2}, \quad v' = v, \quad \mu' = \mu_0 \mu, \\ \kappa' &= \kappa_0 \kappa, \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma, \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p}, \\ \beta &= T' \beta', \quad N^2 = \frac{\kappa_0}{2\mu_0 + \kappa_0}, \quad N_1 = \frac{2\mu_0 l^2}{\delta^2 \kappa_0}; \\ T' &= T' T; \quad T' = \frac{\mu_0 \Omega^2 r_0^2}{\Pi l}; \quad l^2 = \frac{\gamma_0}{4\mu_0}. \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая выражения (5), из (3) и (4) получим систему безразмерных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + N^2 \frac{\partial v_i}{\partial r} &= \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}; \\ \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} &= \frac{v_i}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{du_i}{dr}; \quad \frac{\partial u_i}{\partial \theta} + \frac{\partial v_i}{\partial r} = 0; \\ v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad v = 0 \text{ при } r = h(\theta); \\ v &= 0, \quad u = 0, \quad v = 0 \text{ при } r = 0, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ v &= v^*(\theta), \quad u = u^*(\theta), \quad v = 0 \\ &\text{при } r = \eta_2, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi; \\ p(0) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p}. \end{aligned} \quad (6)$$

К граничным условиям добавляем:

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

Полагаем, что функции $u^*(\theta)$ и $v^*(\theta)$ определяются соотношениями

$$v^*(\theta) = \frac{1}{h(\theta) - \eta_2}, \quad u^*(\theta) = \frac{\eta \sin \theta}{h(\theta) - \eta_2}. \quad (8)$$

Учитывая малость зазора, осредняем второе уравнение системы (6) по толщине смазочного слоя:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{N_i^2}{2N_1 h} (2r - h) &= \frac{1}{j e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp_i}{d\theta}, \\ v_i &= \frac{1}{2N_1 h} (r^2 - rh), \quad \frac{\partial u_i}{\partial r} + \frac{\partial v_i}{\partial \theta} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Автомоделное решение задачи (9) с учетом граничных условий ищем в виде

$$\begin{aligned} v_i &= \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta); \quad u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta); \\ \psi_i(r, \theta) &= \tilde{\psi}_i(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = \tilde{v}_i(\xi_i); \\ U_i(r, \theta) &= -\tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta); \\ \xi_2 &= \frac{r_i}{h(\theta)} \text{ при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \end{aligned}$$

$$\xi_{1,3} = \frac{r - \eta_2}{h(\theta) - \eta_2} \text{ при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) с учетом граничных условий (6) – (7), получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_i''' &= a_i; & \tilde{u}_i'' &= b_i - \frac{N^2}{2N_1}(2\xi_i - 1); \\ \tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) &= 0; \\ \frac{1}{je^{ap-\beta T}} \frac{dp_i}{d\theta} &= \left(\frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} \right), & i &= 1,3; \\ \frac{1}{je^{ap-\beta T}} \frac{dp_2}{d\theta} &= -\alpha \left(\frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Система уравнений (11) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} v_i(0) &= 0; & \tilde{\psi}'_i(0) &= 0, & \tilde{\psi}'_i(1) &= 0, \\ \tilde{u}'_i(1) &= -\eta \sin \theta; & \tilde{v}'_i(1) &= 0; \\ v_i(1) &= 0; & \tilde{u}_i(0) &= 0; & \tilde{v}_i(0) &= 1; \\ \int_0^1 \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0; \\ \int_0^{\xi_i} \tilde{u}_i(\xi_i) d\xi_i &= 0; \\ p(0) &= p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P}. \end{aligned} \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (11) с учетом граничных условий (12), в результате получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}'_i(\xi_i) &= a_i \frac{\xi_i}{2} (\xi_i - 1), \\ \tilde{u}_i(\xi_i) &= b_i \frac{\xi_i^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_i^3}{3} - \frac{\xi_i^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_i}{2} + 1 \right) \xi_i; \\ \tilde{\psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2} (\xi_2 - 1), \\ \tilde{u}_2(\xi_2) &= b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_2^3}{3} - \frac{\xi_2^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_2}{2} + 1 \right) \xi_2 + 1; \\ \tilde{\psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2} (\xi_3 - 1), \\ \tilde{u}_3(\xi_3) &= b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi_3^3}{3} - \frac{\xi_3^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{b_3}{2} + 1 \right) \xi_3 + 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Из уравнения $\tilde{u}_i(\xi_i) + \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0$ следует, что

$$b_1 = b_2 = b_3 = 6. \quad (14)$$

Из равенства $p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{P_g}{P}$ имеем:

$$\begin{aligned} a_1 &= -12(1 - \eta_2) \frac{\sqrt{1 - \tilde{\eta}^2}}{2 + \tilde{\eta}^2}; \\ a_2 &= -6 \left(1 - \frac{\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right); \\ a_3 &= -6(1 - \eta_2) \left(1 - \frac{\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\tilde{\eta} = \frac{\eta}{1 - \eta_2}$.

Безразмерное гидродинамическое давление в смазочном слое определим из уравнения

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\mu_i(\theta)} \frac{dp_i}{d\theta} &= \frac{b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3}, \\ i &= 1,3; \\ \frac{1}{j\mu_2(\theta)} \frac{dp_2}{d\theta} &= \frac{b_2}{h^2(\theta)} + \frac{a_2}{h^3(\theta)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для решения уравнения (16) сначала определим $\mu(\theta)$ как функцию, зависящую от θ .

При определении $\mu(\theta)$ используем выражение, отражающее закономерность изменения скорости диссипации энергии смазочной среды:

$$\frac{dH'}{d\theta} = \frac{2\mu_0\mu\Omega^2 r_0^2 h(\theta)}{\delta} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}'(\xi)}{h^2(\theta)} \right)^2 d\xi. \quad (17)$$

Тогда повышение температуры определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{dT'}{d\theta} &= \frac{dH'}{d\theta} \cdot \frac{1}{C_p Q} = \\ &= \frac{1}{C_p Q} \cdot \frac{2\mu_0\mu\Omega^2 r_0^2 h(\theta)}{\delta} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}'(\xi)}{h^2(\theta)} \right)^2 d\xi, \end{aligned} \quad (18)$$

$$Q_i = \Omega r_0 \delta \int_0^1 \tilde{\psi}''(\xi) d\xi = -\Omega r_0 \delta \frac{a_i}{12}. \quad (19)$$

Продифференцируем по θ выражение $\mu = e^{ap-\beta T}$, получим

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{d\theta} &= \mu(\theta) \left(\alpha \frac{dp}{d\theta} - \beta \frac{dT}{d\theta} \right) = \\ &= \mu(\theta) \alpha \frac{dp}{d\theta} + \frac{\mu^2(\theta) \beta 24\mu_0 \Omega r_0 h(\theta)}{T C_p \delta^2 a_i} \times \\ &\quad \times \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}'(\xi)}{h^2(\theta)} \right)^2 d\xi. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом уравнения (16) для определения $\mu(\theta)$ приходим к следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\mu_i^2(\theta)} \frac{d\mu_i}{d\theta} &= \frac{\alpha b_i}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\alpha a_i}{(h(\theta) - \eta_2)^3} + \\ &\quad + \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0 (h(\theta) - \eta_2)}{T C_p \delta^2 a_i} \times \\ &\quad \times \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{u}'(\xi_i)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right)^2 d\xi, \quad i = 1,3; \end{aligned}$$

$$\frac{1}{j\mu_2^2(\theta)} \frac{d\mu_2}{d\theta} = \frac{\alpha b_2}{h^2(\theta)} + \frac{\alpha a_2}{h^3(\theta)} + \frac{24\mu_0\beta\Omega r_0 h(\theta)}{T C_p \delta^2 a_2} \cdot \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}''(\xi_i)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}'(\xi_i)}{h(\theta)} \right) d\xi. \quad (21)$$

Интегрируя эти уравнения, получим:

$$j\mu_i(\theta) = \frac{1}{1 - \beta K_i [\Delta_1 I_3(\theta) + \Delta_2 I_2(\theta) + \Delta_3 I_1(\theta)] - \alpha [b_i I_2(\theta) + a_i I_3(\theta)]}, \quad i = 1, 3;$$

$$j\mu_2(\theta) = \frac{1}{1 - \beta K_2 [\Delta_1 I_3(\theta) + \Delta_2 I_2(\theta) + \Delta_3 I_1(\theta)] - \alpha [b_1 I_2(\theta) + a_2 I_3(\theta)]}, \quad (22)$$

где $K_i = \frac{24\mu_0\Omega r_0}{T C_p \delta^2 a_i}$; $\Delta_1 = \int_0^1 (\tilde{\psi}''(\xi_i))^2 d\xi_i = \frac{a_i^2}{12}$;

$$\Delta_2 = 2 \int_0^1 (\tilde{\psi}''(\xi_i) \cdot \tilde{v}'(\xi_i)) d\xi_i = \frac{1}{6} b_i a_i = a_i;$$

$$\Delta_3 = \int_0^1 (\tilde{v}'(\xi_i))^2 d\xi_i = 4; \quad I_{K_i} = \int_0^1 \frac{d\theta}{h_i^K(\theta)}.$$

Решая уравнение (22) относительно $\mu(\theta)$, с точностью $O(\eta^2)$, $O(\eta_1^2)$, $O(\eta_2^2)$, $O(\tilde{\eta}^2)$, $O(\eta\eta_1)$, $O(\eta\tilde{\eta})$, $O(\eta_2\eta)$, $O(\eta_2\tilde{\eta})$ включительно, получим следующие аналитические выражения:

$$j\mu_1(\theta) = 1 + \beta K_1 \left[4\theta + 28\eta \sin \theta - 24\tilde{\eta}^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) - 60\theta\tilde{\eta}^2 - 20\theta\eta_2 - 40\eta_2\eta \sin \theta \right] - 3\alpha \left[6\theta + 10\eta \sin \theta - 11\tilde{\eta}^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + 12\eta_2\theta + 40\eta_2\eta \sin \theta - 70\eta_2^2\theta + 12\tilde{\eta}^2\theta \right];$$

$$j\mu_2(\theta) = 1 + \beta K_2 \left[\begin{array}{l} \theta + \eta \sin \theta - \frac{6\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \sin \theta - \\ - \frac{3}{2} \eta^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + \frac{3\eta^2\theta}{\theta_1^2} \sin^2 \theta_1 \end{array} \right] + 6\alpha \left[\begin{array}{l} - \eta \sin \theta + \eta^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + \\ + \frac{\eta\theta \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{3\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \sin \theta \end{array} \right];$$

$$j\mu_3(\theta) = 1 + \beta K_3 \left[\begin{array}{l} \theta + \eta \sin \theta + \eta_2\theta - \\ - 3\eta_2\eta \sin \theta + \frac{3\tilde{\eta}^2\theta}{\theta_2^2} \sin^2 \theta_2 - \\ - 6 - \eta_2^2\theta - \frac{6\eta\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \sin \theta - 12 \frac{\tilde{\eta}\eta_2\theta}{\theta_2} \sin \theta_2 - \\ - \frac{3}{2} \tilde{\eta} \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) + 4\eta_2\tilde{\eta} \sin \theta \right] - 6\alpha \left[\begin{array}{l} - \eta \sin \theta + \tilde{\eta}^2 \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) - \\ - 4\eta_2\eta \sin \theta + \frac{\tilde{\eta}\theta \sin \theta_2}{\theta_2} + \\ + \frac{3\eta\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta \sin \theta_2 + \frac{2\eta\tilde{\eta}\theta}{\theta_2} \sin \theta_2 \end{array} \right]. \quad (23)$$

С учетом (16) и (23) безразмерное гидродинамическое давление определяется выражением:

$$p_1(\theta) = -3j \left[\begin{array}{l} \theta(6 - 11\tilde{\eta}^2 + 12\eta_2 - 70\eta_2^2 + 12\tilde{\eta}^2) + \\ + \sin \theta(10\eta + 40\eta_2\eta) - \frac{11}{2} \tilde{\eta}^2 \sin 2\theta \end{array} \right] - 3\beta K_1 \left[\theta^2(24 - 72\eta_2 - 280\eta_2^2 - 600\tilde{\eta}^2) + \theta \sin \theta(208\eta + 56\eta_2\eta) - 144\tilde{\eta}^2\theta \sin 2\theta + 280\eta^2 \sin^2 \theta \right] +$$

$$+ 9\alpha \left[\theta^2(36 + 72\tilde{\eta}^2 - 696\eta_2^2 + 132\tilde{\eta}^2 + 144\eta_2) + \theta \sin \theta(720\eta_2\eta + 120\eta) + 100\eta^2 \sin^2 \theta - 132\tilde{\eta}^2\theta \sin 2\theta \right] + \frac{P_g}{p};$$

$$p_2(\theta) = j\theta \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) +$$

$$+ \sin \theta \left(-6\eta + \frac{18\eta}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) + 3\eta^2 \sin 2\theta + \beta K_2 \left[\theta^2 + \left(6\eta^2 + \frac{6\eta \sin \theta_1}{\theta_1} \right) +$$

$$+ \theta \sin \theta \left(-6\eta + \frac{18\eta \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} \right) + 3\eta^2\theta \sin 2\theta - \sin^2 \theta \left(6\eta^2 - \frac{18\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) \right] +$$

$$+ 36\alpha \left[\sin^2 \theta \left(\eta^2 + \frac{9\eta^2}{\theta_1^2} \sin^2 \theta_1 - \frac{6\eta^2}{\theta_1} \sin \theta_1 \right) + \frac{\eta^2\theta^2 \sin^2 \theta_1}{\theta_1^2} -$$

$$- \theta \sin \theta \left(\frac{2\eta^2 \sin \theta_1}{\theta_1} + \frac{6\eta^2 \sin^2 \theta_1}{\theta_1^2} \right) \right] + \frac{P_g}{p};$$

$$p_3(\theta) = 6j \sin \theta \left(\eta + 4\eta_2\eta - \frac{3\eta\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 \right) -$$

$$- 6\theta \left(\tilde{\eta}^2 + \frac{\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{2\eta\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} \right) -$$

$$- 3\tilde{\eta}^2 \sin 2\theta - \beta K_3 \left[\theta^2 \left(6\tilde{\eta}^2 + \frac{6\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{12\eta\tilde{\eta} \sin \theta_2}{\theta_2} + \frac{6\tilde{\eta}\eta_2 \sin \theta_2}{\theta_2} - \frac{9\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{\theta_2} \right) -$$

$$- 6\eta \sin \theta - \theta \sin \theta \left(30\eta_2\eta - \frac{24\eta\tilde{\eta}}{\theta_2} \sin \theta_2 - 9\tilde{\eta}\eta \right) +$$

$$+ \theta \sin 2\theta \left(3\tilde{\eta}^2 - \frac{9\tilde{\eta}^2 \sin \theta_2}{2\theta_2} \right) - 6\eta^2 \sin^2 \theta + \frac{9}{2} \tilde{\eta}\eta \sin \theta \sin 2\theta \right] +$$

$$+ 36\alpha \left[\eta^2 \sin^2 \theta + \frac{\tilde{\eta}^2\theta^2}{\theta_2^2} \sin^2 \theta_2 - \frac{2\eta\tilde{\eta}\theta}{\theta_2} \sin \theta_2 \sin \theta \right] + \frac{P_g}{p}. \quad (24)$$

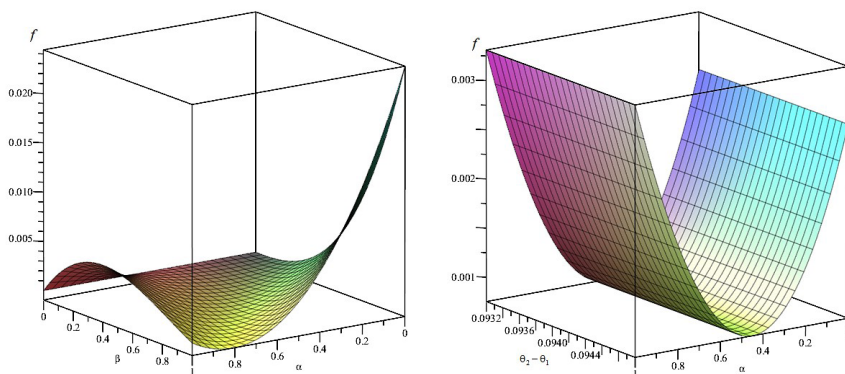


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения в подшипнике с канавкой от параметров, характеризующих вязкость смазочного материала, температуры и ширины канавки

Зная значения гидродинамического давления и скорости, находим аналитические выражения для несущей способности и силы трения:

$$R_x = \frac{6j(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega r_0^3}{2\delta^2} \times \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{P_g}{P} \right) \cos\theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{P_g}{P} \right) \cos\theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{P_g}{P} \right) \cos\theta d\theta \right]$$

$$R_y = \frac{6j(2\mu_0 + \kappa_0)\Omega r_0^3}{2\delta^2} \times \left[\int_0^{\theta_1} \left(p_1 - \frac{P_g}{P} \right) \sin\theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(p_2 - \frac{P_g}{P} \right) \sin\theta d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(p_3 - \frac{P_g}{P} \right) \sin\theta d\theta \right] \quad (25)$$

$$L_{тр} = j\mu_0\Omega r_0^3 \left(1 + (\alpha p - \beta T) - \frac{(\alpha p - \beta T)^2}{2} \right) \times \left[\int_0^{\theta_1} \left(\frac{\tilde{w}_1''(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{u}_1'(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right) \times d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{\tilde{w}_2''(\theta)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{u}_2'(\theta)}{h(\theta)} \right) d\theta + \int_{\theta_2}^{2\pi} \left(\frac{\tilde{w}_3''(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)^2} + \frac{\tilde{u}_3'(\theta)}{(h(\theta) - \eta_2)} \right) d\theta \right]$$

Численный анализ полученных расчетных моделей был проведен при скорости $\Omega = 100 - 2400 \text{ с}^{-1}$, $\theta_2 - \theta_1 = 5,74 - 22,92 \text{ град.}$, $\sigma = 4,9 - 24,5 \text{ МПа}$, $\mu_0 = 0,0707 - 0,0076 \text{ Нс/м}^2$, $\alpha = 0 - 1$, $\beta = 0 - 1$, $T = 25 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta = 0,05 \cdot 10^{-3} - 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $r_0 = 0,01995 - 0,04993 \text{ м}$, $P_g = 0,2 \text{ МПа}$. Результаты теоретических и экспериментальных испытаний коэффициента трения при использовании микрополярного смазочного материала приведены для скорости $0,3 \text{ м/с}$ (рис. 2).

Проведение экспериментов. Экспериментальное исследование состоит из верификации разработанной расчетной модели с маслосодержащей канавкой; комплекса экспериментальных исследований с новой конструкцией опорной поверхности подшипниковой втулки с антифрикционным поли-

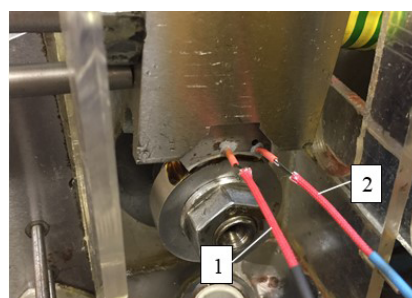


Рис. 3. Определение объемной температуры в паре трения «ролик-колодка»: 1, 2 — термопары

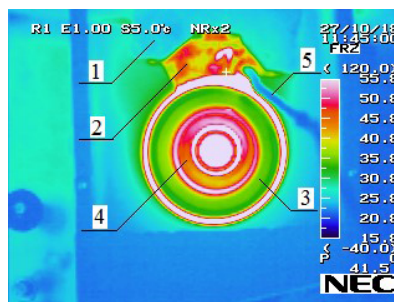


Рис. 4. Показания тепловизора при определении объемной температуры в паре трения «ролик-колодка» с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием: 1 — колодка-колодка; 2 — опытный образец; 3 — ролик; 4 — контррайка; 5 — термопара

мерным покрытием, имеющим канавку, с температурой плавления $327 \text{ }^\circ\text{C}$.

Триботехнические экспериментальные исследования радиальных подшипников проводились на модернизированной машине трения ИИ 5018 (рис. 3, 4).

Образцы были изготовлены в виде частичных вкладышей из кольцевой заготовки по центральному углу 60° . На их поверхности наносились полимерные покрытия и канавки на глубину покрытия, равную $0,55 \text{ мм}$. Вал изготовлен из стали 45 (ГОСТ 1050-2013). Кроме того, колодки имели отверстия для термопар (рис. 3).

Результаты исследований. В результате теоретического исследования установлено, что несущая

Результаты теоретического исследования поверхности подшипниковой втулки с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

№	σ, МПа	Угловые координаты ($\theta_2 - \theta_1$)				
		5,74	10,03	14,32	18,61	22,92
		Коэффициент трения				
1	4,9	0,008890	0,0112130	0,009200	0,0060000	0,00333000
2	9,8	0,005590	0,0055910	0,005753	0,0040850	0,00269650
3	14,7	0,002293	0,0023920	0,002306	0,0021705	0,00205700
4	19,6	0,002195	0,0022613	0,002204	0,0021136	0,00203793
5	24,5	0,002097	0,0021307	0,002102	0,0020570	0,00201887

Таблица 2

Результаты исследования поверхности подшипниковой втулки с фторопластсодержащим композиционным полимерным покрытием

№	Режим		Коэффициент трения				Погрешность, %	
	σ, МПа	V, м/с	Теоретический результат		Экспериментальное исследование			
			Полимерное покрытие	Покрытие в канавке	Покрытие	Покрытие с канавкой		
1	4,9	0,3	0,0115	0,0097	0,0139	0,0114	5–12	6–13
2	9,8	0,3	0,0060	0,0043	0,0074	0,0042		
3	14,7	0,3	0,0040	0,0021	0,0053	0,0033		
4	19,6	0,3	0,0055	0,0031	0,0077	0,0052		
5	24,5	0,3	0,0095	0,0064	0,0107	0,0078		

способность повышается примерно на 12–14 %, а коэффициент трения снижается на 8–10 % в диапазоне исследованных режимов (табл. 1).

В процессе экспериментального исследования были установлены области рационального применения полученных моделей. Получен устойчивый гидродинамический режим трения после двухминутной приработки, при этом нагрузка увеличивалась ступенчато 5 раз до 24,5 МПа (табл. 2).

Обсуждение результатов. Теоретическим исследованием установлено необходимое сечение канавки на поверхности подшипниковой втулки для выхода подшипника в режим гидродинамического смазывания при заданной нагрузке.

После этого разработана расчетная модель, описывающая течение микрополярного смазочного материала в рабочем зазоре. При разработке модели учтена зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры. Полученные результаты позволяют установить основные эксплуатационные характеристики.

Исследуемая конструкция работает следующим образом: при вращении цапфы в канавке возникает циркуляционное движение, при этом возникающая сила приподнимает цапфу, в результате чего образуется гидродинамический клин. Разработан теоретически и подтвержден экспериментально новый способ разработки расчетных моделей, позволяющий значительно расширить область применения в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т.д. — там, где требуется обеспечение гидродинамического режима смазывания.

Основные выводы

1. В результате исследования достигнуто существенное расширение возможностей применения на практике таких расчетных моделей подшипника

с полимерным покрытием с канавкой, работающего в гидродинамическом режиме смазывания, позволяющее провести оценку его эксплуатационных характеристик.

2. Расчетные модели учитывают применение дополнительного смазывания полимерным покрытием и канавку на поверхности подшипниковой втулки.

3. Применение исследованных радиальных подшипников скольжения с канавкой шириной 3 мм значительно повышает их несущую способность (на 12–14 %) и снижает коэффициент трения на 8–10 %.

4. Конструкция подшипника с полимерным покрытием и канавкой шириной 3 мм обеспечила стабильное всплытие цапфы, что экспериментально подтвердило правильность результатов теоретических исследований.

Условные обозначения:

r_0 — радиус вала; r_1 — радиус подшипниковой втулки; h — высота канавки; e — эксцентриситет; ε — относительный эксцентриситет; μ_0 — характеристическая вязкость ньютоновской смазки; κ_0 и γ_0 — характеристические вязкости микрополярной жидкости; μ' — коэффициент динамической вязкости смазочного материала; p' — гидродинамическое давление в смазочном слое; α' , β' — постоянная экспериментальная величина; T — температура; I — механический эквивалент тепла; λ — теплопроводность смазочного материала; $\eta = \frac{l}{\delta}$ — конструктивный параметр; $\eta_2 = \frac{h}{\delta}$ — конструктивный параметр, характеризующий канавку; θ_1 , θ_2 — соответственно угловые координаты канавки; $u'(\theta)$ и $v'(\theta)$ — известные функции, обусловленные наличием полимерного покрытия на поверхности подшипниковой втулки; Q — расход смазочного материала в еди-

ницу времени; C_p — теплоемкость при постоянном давлении; $h(\theta)$ — толщина масляной пленки.

Библиографический список

1. Deligant M., Podevin P., Descombes G. CFD model for turbocharger journal bearing performances // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, Issue 5. P. 811–819.
2. Zadorozhnaya E., Sibiryakov S., Hudyakov V. Theoretical and experimental investigations of the rotor vibration amplitude of the turbocharger and bearings temperature // *Tribology in Industry*. 2017. Vol. 39, no. 4. P. 452–459.
3. Sharma S. C., Kumar V., Jain S. C. [et al.]. Thermohydrostatic analysis of slotentry hybrid journal bearing system // *Tribology International*. 2002. Vol. 35, no. 9. P. 561–577.
4. Kucinski B., Fillon M. An Experimental study of transient thermal effects in a plain journal bearing // *Journal of Tribology*. 1999. Vol. 121, no. 2. P. 327–332.
5. Khatak P., Garg H. C. Performance analysis of capillary compensated hybrid journal bearing by considering combined influence of thermal effects and micropolar lubricant // *Journal of Tribology*. 2016. Vol. 139, no. 1. P. 011707.
6. Прокопьев В. Н., Караваев В. Г. Термогидродинамическая задача смазки сложнагруженных опор скольжения не-ньютоновскими жидкостями // *Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение*. 2003. Вып. 3, no. 1 (17). С. 56–66.
7. Прокопьев В. Н., Бояршинова А. К., Задорожная Е. А. Многосекционный алгоритм интегрирования уравнения Рейнольдса для гидродинамических давлений в смазочном слое опор скольжения // *Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования*. Москва, 2001. С. 6–10.
8. Прокопьев В. Н., Бояршинова А. К., Гаврилов К. В. Гидромеханические характеристики сложнагруженных подшипников скольжения с учетом некруглости цапфы и втулки // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2009. № 4. С. 98–104.
9. Старостин Н. П., Кондаков А. С., Васильева М. А. Тепловая диагностика трения в самосмазывающихся радиальных подшипниках движения. Часть 2: Учет в математической модели подвижности вала // *Трение и износ*. 2010. Т. 31, № 6. С. 590–594.
10. Старостин Н. П., Кондаков А. С., Васильева М. А. Трехмерная диагностика трения в подшипниках скольжения // *Математические заметки ЯГУ*. 2012. Т. 19, № 2. С. 187–195.
11. Айнбиндер С. Б., Дзенис А. А., Тюнина Э. Л. Расчет температуры металлополимерной пары при тяжелых режимах трения // *Механика полимеров*. 1973. № 4. С. 75–81.
12. Александров В. М., Губарева Е. А. О расчете контактных температур, возникающих при вращении вала в подшипнике // *Трение и износ*. 2007. Т. 28, № 1. С. 39–43.
13. Бабешко В. А., Ворович И. И. К расчету температур, возникающих при вращении вала в подшипнике // *ПМТФ*. 1968. № 2. С. 135–137.
14. Колесников В. И., Подрезов С. А., Алексеев В. А. К вопросу о теплонагруженности металлонаполненных полимерных подшипников скольжения // *Трение и износ*. 1982. Т. 3, № 6. С. 1009–1015.
15. Колесников В. И., Кучеров В. А., Подрезов С. А. Исследование температурных полей некоторых узлов трения // *Физико-механические процессы в зоне контакта деталей машин*. Калинин, 1983. С. 70–77.
16. Огарков Б. И., Голомеева Л. И. Расчет стационарного поля анизотропного вкладыша подшипника скольжения // *Известия вузов. Машиностроение*. 1970. № 8. С. 43–48.
17. Огарков В. И., Кухаренко С. П. Аналитико-экспериментальный метод определения температурного поля двухслойного анизотропного вкладыша подшипника // *Трение и износ*. 1985. Т. 6, № 2. С. 228–234.
18. Павлова И. В., Колесников В. И., Евдокимов Ю. А. Исследование распределения температуры в тонкостенных

металлополимерных подшипниках скольжения // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2001. № 2. С. 29–33.

19. Коднир Д. С., Жильников Е. П., Байбородов Ю. И. Эластогидродинамический расчет деталей машин. Москва: Машиностроение, 1988. 160 с.
20. Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. Москва: Машиностроение, 1976. 304 с.
21. Перель Л. Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор. Москва: Машиностроение, 1983. 543 с.
22. Решетов Д. Н. Детали машин. Москва: Машиностроение, 1989. 496 с.
23. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник: пер. с англ. Москва: Атомиздат, 1979. 216 с.
24. Белоусов М. Д., Шестаков А. Л. Метод самодиагностики термомпреобразователя сопротивлений в процессе работы // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2009. № 3 (136). С. 17–19.
25. Гоуд. Сдавливаемые пленки с параллельными поверхностями. Влияние зависимости вязкости от температуры и давления // *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1967. № 4. 267 с.

МУКУТАДЗЕ Мурман Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), г. Ростов-на-Дону.

SPIN-код: 9636-3223

AuthorID (РИНЦ): 389305

ORCID: 0000-0003-2910-3047

AuthorID (SCOPUS): 55049709500

ResearcherID: AAI-2420-2021

Адрес для переписки: murman1963@yandex.ru

АБДУЛРАХМАН Хайдар Нофалевич, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-1588-9311

Адрес для переписки: abdulrahm.haidar@gmail.com

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

ORCID: 0000-0002-8469-7671

Адрес для переписки: shvedovavalya@yandex.ru

БАДАХОВ Григорий Андреевич, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0002-0738-2529

Адрес для переписки: 77grigo77@mail.ru

ЗИНОВЬЕВ Никита Владимирович, аспирант кафедры «Высшая математика» РГУПС, г. Ростов-на-Дону.

ORCID: 0000-0001-7966-5512

Адрес для переписки: zinovev1998.2013@ya.ru

Для цитирования

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

Статья поступила в редакцию 03.04.2023 г.

© М. А. Мукутадзе, Х. Н. Абдулрахман, В. Е. Шведова,

Г. А. Бадахов, Н. В. Зиновьев

STUDIES ON WEAR RESISTANCE OF THE RADIAL BEARING DESIGN TAKING INTO ACCOUNT RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MICROPOLAR LUBRICANT

The article is devoted to the development and analysis of a model of the motion of a micropolar lubricant in the working gap of a radial plain bearing with a fluoroplastic-containing antifriction composite polymer coating and with a groove on the supporting surface. New models are obtained on the basis of classical equations in the «thin layer» approximation and the continuity equation, which describes the turbulent mode of motion of a lubricant with micropolar rheological properties. The results of the numerical analysis of the obtained models of existing operational characteristics made it possible to obtain a quantitative assessment of the effectiveness of the support profile with a fluoroplastic-containing antifriction composite polymer coating with an axial groove. To complete the complex of studies and verify theoretical developments, experimental studies are carried out. The novelty of the work lies in the concretization of the technique of engineering calculations for the design of an effective radial bearing with an antifriction polymer coating with an axial groove on the bearing surface of the bearing bush, taking into account the dependence of the rheological properties of a micropolar lubricant on pressure and temperature in a turbulent mode, which makes it possible to estimate the value of the main operational characteristics: hydrodynamic pressure, load ability and coefficient of friction, as well as to expand the scope of practical application of models for engineering calculations. Thus, the design of a radial bearing with a polymer-coated support profile, a groove 3 mm wide, ensured a stable ascent of the shaft on a hydrodynamic wedge, which experimentally confirmed the correctness of the results of theoretical studies of a radial bearing with a diameter of 40 mm at a sliding speed of 0,32–3 m/s, load 4,9–24,5 MPa.

Keywords: radial bearing, wear resistance study, antifriction polymer composite coating, groove, verification, turbulent flow regime, dependence of viscosity on pressure and temperature.

References

1. Deligant M., Podevin P., Descombes G. CFD model for turbocharger journal bearing performances // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, Issue 5. P. 811–819. (In Engl.).
2. Zadorozhnaya E., Sibiryakov S., Hudyakov V. Theoretical and experimental investigations of the rotor vibration amplitude of the turbocharger and bearings temperature // *Tribology in Industry*. 2017. Vol. 39, no. 4. P. 452–459. (In Engl.).
3. Sharma S. C., Kumar V., Jain S. C. [et al.]. Thermohydrostatic analysis of slot-entry hybrid journal bearing system // *Tribology International*. 2002. Vol. 35, no. 9. P. 561–577. (In Engl.).
4. Kucinschi B., Fillon M. An Experimental study of transient thermal effects in a plain journal bearing // *Journal of Tribology*. 1999. Vol. 121, no. 2. P. 327–332. (In Engl.).
5. Khatak P., Garg H. C. Performance analysis of capillary compensated hybrid journal bearing by considering combined influence of thermal effects and micropolar lubricant // *Journal of Tribology*. 2016. Vol. 139, no. 1. P. 011707. (In Engl.).
6. Prokop'ev V. N., Karavaev V. G. Termogidrodinamicheskaya zadacha smazki slozhnonagruzhennykh opor skol'zheniya nen'yutonovskimi zhidkostyami [Thermohydrodynamic problem of lubrication of complexly loaded sliding bearings with non-Newtonian fluids] // *Vestnik YUURGU. Seriya Mashinostroenie. Bulletin of SUSU. Mechanical Engineering Series*. 2003. Issue 3, no. 1 (17). P. 56–66. (In Russ.).
7. Prokop'ev V. N., Boyarshinova A. K., Zadorozhnaya E. A. Mnogosetochnyj algoritm integrirovaniya uravneniya Rejnol'dsa dlya gidrodinamicheskikh davlenij v smazochnom sloe opor skol'zheniya [A multigrid algorithm for integrating the Reynolds equation for hydrodynamic pressures in the lubricating layer of sliding supports] // *Trudy Mezhdunarodnogo foruma po problemam nauki, tekhniki i obrazovaniya. Proceedings of the International*

Forum on Problems of Science, Technology and Education. Moscow, 2001. P. 6–10. (In Russ.).

8. Prokop'ev V. N., Boyarshinova A. K., Gavrilov K. V. Gidromekhanicheskie karakteristiki slozhnograduzhennykh podshpnikov skol'zheniya s uchetom nekruglostey capfy i vtulki [Hydromechanical characteristics of complex-loaded sliding bearing with allowance for nonroundness of the pivot shaft and bush] // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. 2009. No. 4. P. 98–104. (In Russ.).

9. Starostin N. P., Kondakov A. S., Vasil'eva M. A. Teplovaya diagnostika treniya v samosmazyvayushchih radial'nykh podshpnikakh dvizheniya. Chast' 2: Uchet v matematicheskoy modeli podvizhnosti vala [Thermal diagnostics of friction in self-lubricating radial motion bearings. Part 2: Accounting in the mathematical model of shaft mobility] // *Trenie i iznos. Friction and Wear*. 2010. Vol. 31, no. 6. P. 590–594. (In Russ.).

10. Starostin N. P., Kondakov A. S., Vasil'eva M. A. Trekhmernaya diagnostika treniya v podshpnikakh skol'zheniya [Three-dimensional diagnostics of friction in sliding bearings] // *Matematicheskie zametki YAGU. Mathematical Notes of YSU*. 2012. Vol. 19, no. 2. P. 187–195. (In Russ.).

11. Ajnbinder S. B., Dzenis A. A., Tyunina E. L. Raschet temperatury metallpolimernoj pary pri tyazhelykh rezhimakh treniya [Calculation of the temperature of a metal polymer pair under severe friction conditions] // *Mekhanika polimerov. Mechanics of Polymers*. 1973. No. 4. P. 75–81. (In Russ.).

12. Aleksandrov V. M., Gubareva E. A. O raschete kontaktnykh temperatur, voznikayushchih pri vrashchenii vala v podshpнике [On the calculation of contact temperatures arising from the rotation of the shaft in the bearing] // *Trenie i iznos. Friction and Wear*. 2007. Vol. 28, no. 1. P. 39–43. (In Russ.).

13. Babeshko V. A., Vorovich I. I. K raschetu temperatur, voznikayushchih pri vrashchenii vala v podshpнике [To the calculation of temperatures arising from the rotation of the shaft in the bearing] // *PMTF. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1968. No. 2. P. 135–137. (In Russ.).

14. Kolesnikov V. I., Podrezov S. A., Alekseev V. A. K voprosu o teplonagruzhenosti metallonapolnennykh polimernykh podshpnikov skol'zheniya [On the issue of heat loading of metal-filled polymer sliding bearings] // *Trenie i iznos. Friction and Wear*. 1982. Vol. 3, no. 6. P. 1009–1015. (In Russ.).

15. Kolesnikov V. I., Kucherov V. A., Podrezov S. A. Issledovanie temperaturnykh pol'ev nekotorykh uzlov treniya [Investigation of temperature fields of some friction units] // *Fiziko-mekhanicheskie processy v zone kontakta detalej mashin. Physico-mechanical Processes in the Contact Zone of Machine Parts*. Kalinin, 1983. P. 70–77. (In Russ.).

16. Ogarkov B. I., Golomedova L. I. Raschet stacionarnogo polya anizotropnogo vkladysya podshpnika skol'zheniya [Calculation of the stationary field of an anisotropic sliding bearing liner] // *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. News of Universities. Mechanical Engineering*. 1970. No. 8. P. 43–48. (In Russ.).

17. Ogarkov V. I., Kuharenko S. P. Analitiko-eksperimental'nyj metod opredeleniya temperaturnogo polya dvuslojnogo anizotropnogo vkladysya podshpnika [Analytical and experimental method for determining the temperature field of a two-layer anisotropic bearing liner] // *Trenie i iznos. Friction and Wear*. 1985. Vol. 6, no. 2. P. 228–234. (In Russ.).

18. Pavlova I. V., Kolesnikov V. I., Evdokimov Yu. A. Issledovanie raspredeleniya temperatury v tonkostennykh metalopolimernykh podshpnikakh skol'zheniya [Investigation of temperature distribution in thin-walled metal-polymer sliding bearings] // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. Bulletin of the Rostov State University of Railway Transport*. 2001. No. 2. P. 29–33. (In Russ.).

19. Kodnir D. S., Zhil'nikov E. P., Bajborodov Yu. I. Elastogidrodinamicheskij raschet detalej mashin [Elastohydrodynamic calculation of machine parts]. Moscow, 1988. 160 p. (In Russ.).

20. Kodnir D. S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detalej mashin [Contact hydrodynamics of lubrication of machine parts]. Moscow, 1976. 304 p. (In Russ.).

21. Perel' L. Ya. Podshpniki kacheniya: raschet, proektirovanie i obsluzhivanie opor [Rolling bearings: Calculation, design and maintenance of supports]. Moscow, 1983. P. 543. (In Russ.).

22. Reshetov D. N. Detali mashin: uchebnik dlya vuzov. [Machine parts: a textbook for universities]. Moscow, 1989. 496 p. (In Russ.).

23. Uong X. Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov. Spravochnik: per. s angl [Basic formulas and data on heat exchange for engineers: a handbook: trans. from Engl.]. Moscow, 1979. 216 p. (In Russ.).

24. Belousov M. D., Shestakov A. L. Metod samodiagnostiki termopreobrazovatelya soprotivlenij v processe raboty [Method of self-diagnosis of thermal resistance converter in the process of operation] // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics*. 2009. No. 3 (136). P. 17–19. (In Russ.).

25. Gold. Sdavlivaemye plenki s parallel'nymi poverhnostyami. Vliyanie zavisimosti vyazkosti ot temperatury i davleniya [Compressed films with parallel surfaces. Influence of viscosity dependence on temperature and pressure] // *Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov. Theoretical Foundations of Engineering Calculations*. 1967. No. 4. 267 p. (In Russ.).

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

SPIN-code: 9636-3223

AuthorID (RSCI): 389305

ORCID: 0000-0003-2910-3047

AuthorID (SCOPUS): 55049709500

ResearcherID: AAI-2420-2021

Correspondence address: murman1963@yandex.ru

ABDULRAHMAN Haidar Nofalevich, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-1588-9311

Correspondence address: abdulrahm.haidar@gmail.com

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

ORCID: 0000-0002-8469-7671

Correspondence address: shvedovavalya@yandex.ru

BADAKHOV Grigory Andreevich, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0002-0738-2529

Correspondence address: 77grigo77@mail.ru

ZINOVIEV Nikita Vladimirovich, Graduate Student of Higher Mathematics Department, RSTU, Rostov-on-Don.

ORCID: 0000-0001-7966-5512

Correspondence address: zinovev1998.2013@ya.ru

For citations

Mukutadze M. A., Abdulrahman H. N., Shvedova V. E., Badakhov G. A., Zinoviev N. V. Studies on wear resistance of the radial bearing design taking into account rheological properties of micropolar lubricant // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14.

Received April 03, 2023.

© M. A. Mukutadze, H. N. Abdulrahman, V. E. Shvedova, G. A. Badakhov, N. V. Zinoviev

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С НЕЛИНЕЙНЫМ УПРУГИМ ПОДВЕСОМ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследована динамика нелинейной механической системы при воздействии на нее кинематического возмущения. Исследуемая система виброизоляции объекта основана на применении принципа компенсации внешних возмущений — введении в подвеску дополнительного упругого элемента с так называемой отрицательной жесткостью. В результате система виброизоляции защищаемого объекта описывается жесткой кубической силовой характеристикой. Обычно отыскивается приближенное решение на частоте внешнего возмущения, выполняя соответствующую гармоническую линеаризацию нелинейности. В результате получают, что собственная частота консервативной динамической системы равна $k_0^2 \left(1 \pm \frac{3}{4} \mu A^2\right)$, где k_0 — собственная частота консервативной системы при отсутствии нелинейности. И далее исследователь работает, считая динамическую систему линейной. К сожалению, не всегда можно так полагать. Поэтому авторами было выполнено численное моделирование механической системы, описываемой уравнением Дуффинга при кинематическом возбуждении.

Установлено, что в дорезонансной и резонансной областях общее решение должно состоять из трех составляющих: субгармоники порядка $1/3$, основной гармоники и третьей гармоники. Отмечено, что в зарезонансной зоне важны только субгармоника порядка $1/3$ и основная гармоника. Наиболее чувствительным параметром является ускорение защищаемого от вибрации объекта. Поэтому на спектральной мощности ускорения перемещения, кроме основной гармоники, различима и третья гармоника. Построенный численно модуль передаточной функции системы в абсолютном движении указывает на возможность скачка амплитуды, что ярко демонстрируется в лабораторных экспериментах.

Показано, что при исследовании динамики даже простых нелинейных механических систем нужно использовать как приближенные аналитические, так и численные методы, но в сочетании со спектральным анализом, поскольку традиционные методы нелинейной механики не приспособлены к решению задач с учетом сравнительно большого числа составляющих гармоник, появляющихся вследствие нелинейности.

Ключевые слова: механическая система, жесткая кубическая силовая характеристика, уравнение Дуффинга, приближенные и аналитические методы, математическое моделирование, спектральная плотность (мощность), субгармоники, третья гармоника, модуль передаточной функции, амплитудно-частотная характеристика.

Введение. Острая необходимость повышения производительности транспортных и технологических машин различного назначения влечет за собой повышение уровня вибрационных воздействий

на их узлы, а также и на человека-оператора (механика-водителя гусеничных машин, водителя большого грузового автомобиля, машиниста локомотива и др.). Высокие современные требования к качеству

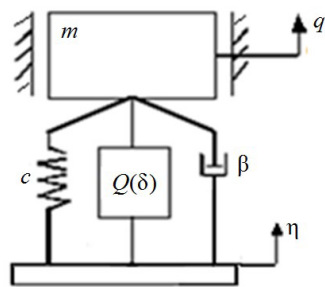


Рис. 1. Расчетная схема системы виброзащиты человека-оператора

виброзащиты не во всех случаях удастся обеспечить путем применения типовых пассивных систем виброизоляции, основанных на применении упругих элементов и гасителей колебаний, так как эти системы не всегда могут обеспечить желаемый вид переходного процесса, стабилизацию объекта в широком диапазоне частот и др.

Известно, что одним из эффективных способов виброзащиты является создание систем, основанных на применении принципа компенсации внешних возмущений, приоритет открытия которого принадлежит Г. В. Щипанову [1]. Основным результатом — условие независимости одной или нескольких координат объекта от внешних возмущений, строго доказан академиком Н. Н. Лузиным [2] и составляет фундамент теории инвариантности. Проблема инвариантности — это определение таких структур и параметров динамических систем, при которых влияния произвольно изменяющихся внешних возмущений и собственных параметров систем на протекающие процессы могут быть частично или полностью компенсированы. Согласно принципу двухканальности, сформулированному академиком Б. Н. Петровым [3] и выражающему критерий физической реализуемости условий для достижения инвариантности выходной координаты системы, необходимо иметь, по крайней мере, два канала передачи воздействия между точкой приложения силы и той точкой, относительно координаты которой достигается инвариантность. На основе принципа компенсации внешних возмущений можно обеспечить весьма малую, почти на порядок меньше, чем у типовой схемы виброизолятора, его динамическую жесткость, что позволяет обеспечить эффективную защиту объекта от воздействия вибрации и ударов [4–9].

Основная часть. Расчетная схема системы виброзащиты с компенсирующим устройством приведена на рис. 1. Здесь введены следующие обозначения: m — масса защищаемого объекта, c — жесткость основного упругого элемента, β — коэффициент вязкого трения гасителя колебаний, q — обобщенная координата, характеризующая перемещение груза, $\eta = \eta_0 \sin \omega t$ — кинематическое внешнее возбуждение, $Q(\delta) = -a_1 \delta + a_3 \delta_3$ — динамическая реакция компенсирующего устройства, $\delta = z - \eta$ — прогиб виброизолятора от положения статического равновесия.

В процессе колебаний в результате сложения динамических реакций основного упругого элемента и компенсирующего устройства формируется жесткая кубическая силовая характеристика системы виброзащиты объекта. Таким образом, динамика этой системы описывается уравнением Дуффинга [10, 11].

Как отмечено в работе [12], математическое моделирование динамики и определение устойчивости в технических системах является актуальнейшим направлением в научном и технологическом развитии любого государства, которое стремится занять лидирующие позиции в современном мире. Изучение предельных динамических режимов и устойчивости необходимо как в классических теоретических, так и в актуальных практических задачах. Поиск и анализ возникновения колебательных режимов требует разработки специальных аналитических и численных методов.

Общеизвестно, что при определенных условиях в решении нелинейного уравнения типа Дуффинга появляются и субгармоники — такие составляющие, частота которых в целое число раз меньше частоты внешнего возмущения. В системе, описываемой уравнением Дуффинга, легче всего экспериментально получить субгармонику, частота которой равна одной трети частоты воздействия. Субгармоники других порядков могут быть также получены экспериментально и их появление предугадывается в результате теоретических исследований [13–17]. Эксперимент показывает, что для получения в системе субгармонического резонанса большое значение имеют условия запуска. При этом амплитуда и частота внешнего возбуждения должны находиться в некоторых заданных пределах и сама система должна удовлетворять определенным начальным условиям. В связи с такой сильной зависимостью от начальных условий очевидно, что субгармонические колебания связаны с тем, что обычно понимается под переходными процессами в линейной колебательной системе.

Колебательную систему, будь она линейной или нелинейной, можно заставить совершать колебания с помощью какого-нибудь начального импульса. Поскольку в любой физической системе существуют потери энергии, то любые колебания, вызванные импульсом, рано или поздно затухают. В нелинейной системе колебания несинусоидальны и содержат высшие составляющие, частота которых в целое число раз больше или меньше основной частоты. Представляется возможным при некоторых условиях поддерживать установившиеся колебания системы, подводя энергию на частоте одной из этих гармоник. При этом, поскольку частота внешнего воздействия в целое число раз больше основной частоты колебаний системы, эта частота является субгармонической по отношению к частоте внешнего возбуждения. Таковы условия возникновения субгармонических колебаний.

Будем выполнять численное моделирование нелинейной механической системы в сочетании со спектральным анализом, который, согласно широко известной монографии Дж. Бендата и А. Пирсола [18], может быть осуществлен разными методами, например, быстрым преобразованием Фурье (БПФ), имеющим тот недостаток, что частотные отношения между «пиковыми» частотами носят рациональный характер. Авторами был применен модернизированный метод спектрального анализа, избавленный от указанного выше недостатка. По результатам моделирования строилась корреляционная функция, которая в дальнейшем на малых отрезках времени аппроксимировалась квадратным полиномом. Следовательно, можно утверждать, что интеграл, представляющий собой произведение корреляционной функции на косинус от некоторой частоты, вычислялся точно. Итак, точность вычис-

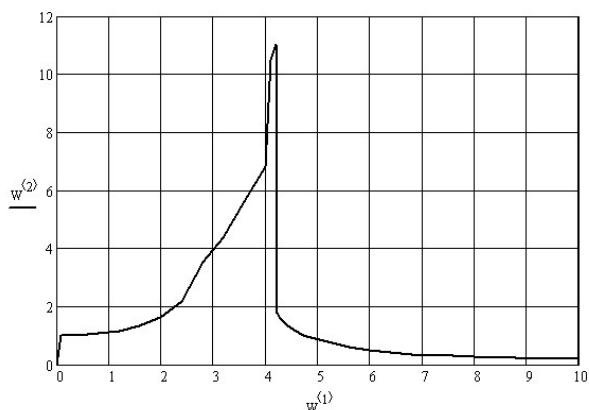


Рис. 2. Модуль передаточной функции системы виброзащиты человека-оператора в абсолютном измерении (АЧХ)

ления спектрального интеграла определяется точностью представления корреляционной функции.

Запишем дифференциальное уравнение рассматриваемой одноступенной механической системы с жёсткой кубической силовой характеристикой при кинематическом возбуждении в общепринятой форме Коши, которая больше всего подходит для численного интегрирования систем дифференциальных уравнений (здесь, в соответствии с рис. 1, $X_1 = q$; $2n = \beta/m$):

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2; \\ \dot{X}_2 = \omega^2 \eta_0 \sin \omega t - 2nX_2 - k_0^2(1 + hX_1^2)X_1. \end{cases} \quad (1)$$

Чтобы избежать дифференциального уравнения с переменными коэффициентами, оно записано с учетом прогиба основного упругого элемента подвешивания. Перейти к абсолютным координатам достаточно просто, добавив к полученному численным методом результату величину внешнего возмущения в данный момент времени. Численное интегрирование системы (1) выполнялось методом Рунге–Кутты четвёртого порядка, написанным на языке программирования в системе Mathcad с добавлением в выводной список правых частей дифференциальных уравнений, ибо стандартная функция данного математического пакета этим свойством не обладает.

На рис. 2 показан модуль передаточной функции системы в абсолютном измерении (чтобы получить этот рисунок ещё более идеальным для построения модуля передаточной функции, нужно пройти с более мелким шагом по частоте; потому в данном случае использовались 37 точек). В представленном рисунке по оси ординат откладывалась величина модуля передаточной функции, а по оси абсцисс — частота внешнего возбуждения. На нём хорошо виден скачок амплитуды колебаний системы с верхней ветви АЧХ на нижнюю ветвь. Понятно, что существует средняя ветвь АЧХ, которая, в принципе, не реализуется численными методами из-за неустойчивости.

Наличие вязкого трения, как известно, скругляет левую и среднюю ветви АЧХ и вследствие этого на ней существует точка, в которой производная от амплитуды колебания по частоте возмущения равна бесконечности. Действительно, модуль передаточной функции с 11,015 мгновено изменился до 1,812, т. е. уменьшился в шесть раз. Далее си-

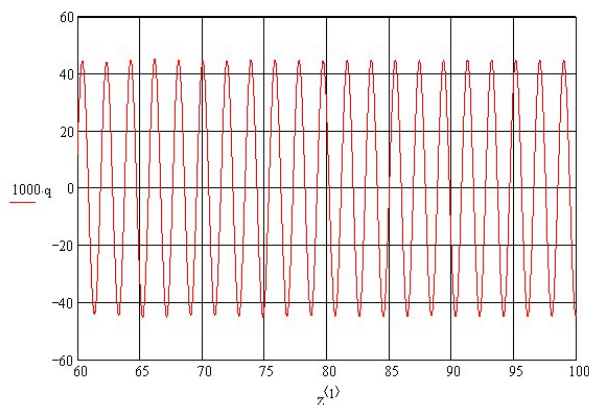


Рис. 3. Абсолютное перемещение защищаемого объекта, мм, при резонансе, $\omega \approx 3,2519$ рад/с

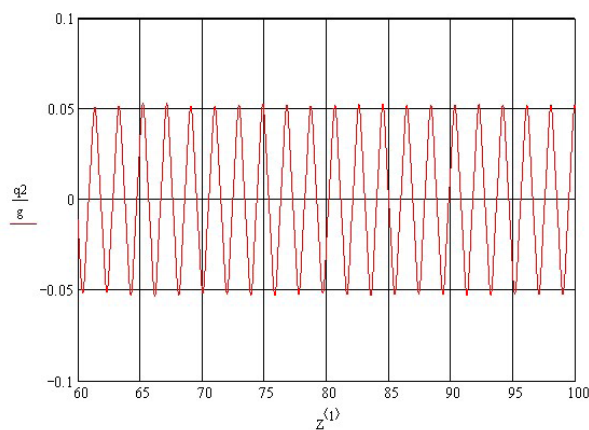


Рис. 4. Абсолютные ускорения объекта, в долях g

стема движется по нижней ветви передаточной функции, асимптотически приближаясь к нулевому значению.

Ниже на рис. 3 представлено абсолютное перемещение защищаемого объекта. Сделаем замечание относительно используемого понятия «резонанс», так как для нелинейных систем оно не означает совпадение частоты внешнего возмущения с собственной частотой системы. Для нелинейной системы понятие резонанса указывает на равенство работ сил трения и возмущающих сил. Но в данном непринципиальном случае подразумевается классическое понятие.

На первый взгляд, кажется, что колебания происходят с одной частотой, но спектральный анализ, выполненный ниже, покажет, что решение состоит из трёх составляющих: основной, субгармоники порядка 1/3 и третьей гармоники. На рис. 3, рис. 4 даны результаты оценивания абсолютного перемещения и абсолютного ускорения защищаемого объекта при резонансе.

Здесь ещё раз отметим особенность подхода к вычислению, вообще говоря, осциллирующего интеграла $\int_0^{\infty} \rho(\tau) \cos \omega \tau dt$, который в литературе, посвящённой этой проблеме, вычисляется чаще всего по приближённым формулам для «прямоугольников» либо «трапеций». Здесь авторами был разработан алгоритм спектрального анализа, использующий метод Филона и заключающийся

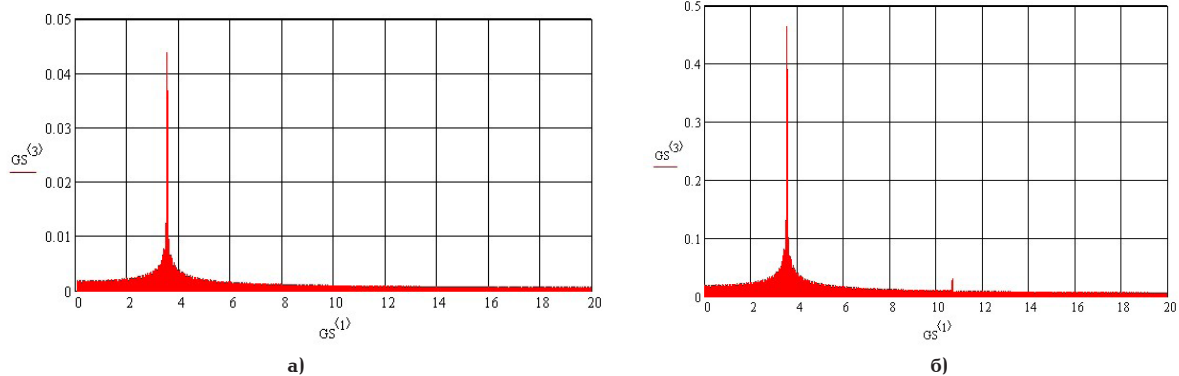


Рис. 5. Спектральные мощности перемещения и ускорения защищаемого объекта в абсолютном движении на резонансной частоте $\omega = 3,2519$ рад/с: а — перемещение сиденья; б — ускорение сиденья

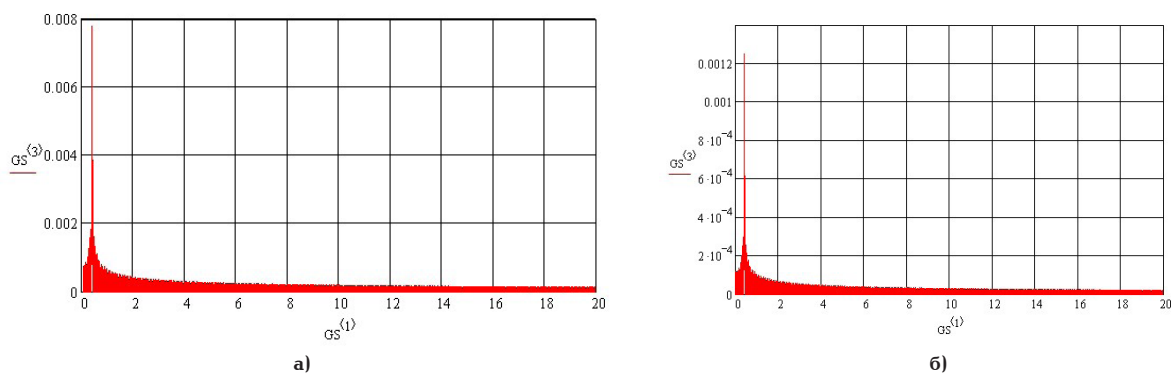


Рис. 6. Спектральные мощности перемещения и ускорения защищаемого объекта в абсолютном движении при частоте $\omega = 0,4$ рад/с (дорезонансная зона): а — перемещение сиденья; б — ускорение сиденья

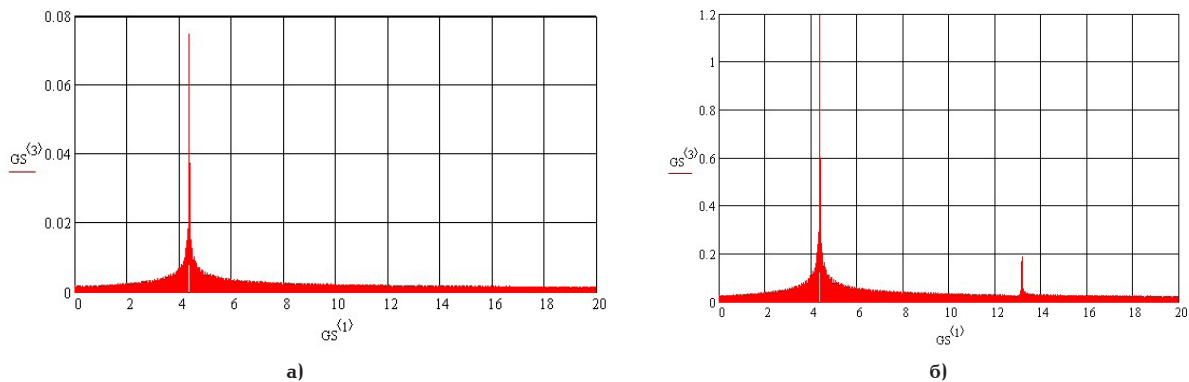


Рис. 7. Спектральные мощности перемещения и ускорения защищаемого объекта в абсолютном движении при частоте $\omega = 4$ рад/с (резонансная зона): а — перемещение; б — ускорение

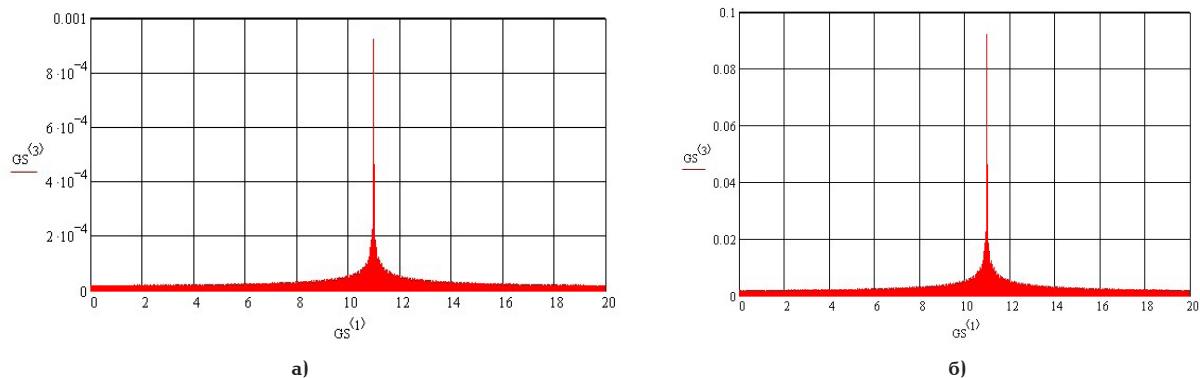


Рис. 8. Спектральные мощности перемещения и ускорения защищаемого объекта в абсолютном движении далеко в зарезонансной зоне при $\omega = 11$ рад/с (зарезонансная зона): а — перемещение; б — ускорение

в том, что корреляционная функция аппроксимировалась на малых отрезках времени полиномом второй степени, хотя степень полинома можно взять и выше.

Следовательно, точность вычисления спектральной плотности теперь определяется точностью представления корреляционной функции, ибо соответствующие интегралы теперь вычисляются точно, так как они являются табличными.

На рис. 5–8 показаны спектральные мощности перемещения и ускорения объекта в абсолютном движении.

Относительное движение исследуемой механической системы спектральному анализу не подвергалось. При этом по осям ординат откладывались перемещения (м) и ускорения (м/с^2), а по оси абсцисс — частота (рад/с).

Выводы. Выполненный анализ результатов математического моделирования поведения нелинейной механической системы с жёсткой кубической силовой характеристикой позволяет заключить следующее:

1) система виброзащиты объекта, построенная на основе принципа компенсации внешних возмущений — введении в структурную схему виброизоляции дополнительного упругого элемента, формирующего в процессе колебаний реакцию, направленную встречно динамической реакции основного упругого элемента, доставляет ей высокие динамические качества;

2) в дорезонансной и резонансной зонах общее решение состоит из субгармонического, основного колебания и третьей гармоники: на частоте возмущения $\omega = 3,252 \text{ с}^{-1}$ наблюдаются ещё составляющие с частотами 3,58 и 10,73 и амплитудами 0,464 и 0,031 м/с^2 ; на частоте возмущения $\omega = 0,4 \text{ рад/с}$ получаем составляющие с частотами 0,44 с^{-1} и 1,32 с^{-1} и амплитудами 0,00782 и 0,00125 м/с^2 ; на частоте возмущения $\omega = 4 \text{ с}^{-1}$ обнаруживаются частоты 4,4 с^{-1} и 13,2 с^{-1} с амплитудами 1,20 и 0,1894 м/с^2 ;

3) в зарезонансной зоне при $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$ еще присутствует составляющая с частотой 11 с^{-1} и амплитудой 0,09238 м/с^2 ;

4) субгармоническую составляющую и третью гармонику на спектральных мощностях перемещений защищаемого от вибрации объекта обнаружить невозможно на фоне шума, создаваемого вследствие того, что анализируемые реализации хотя и имели 172718 точек, но всё же конечны, и эти составляющие чётко обнаруживаются при анализе ускорений защищаемого объекта. Следует также отметить, что амплитуда третьей гармоники по сравнению с основной в 6,25 раза меньше в зарезонансной зоне, в 15,084 раза меньше в резонансной зоне при $\omega = 3,251914 \text{ с}^{-1}$ и в 6,334 раза меньше в резонансной зоне при $\omega = 4 \text{ с}^{-1}$. Важно заметить, что в зарезонансной зоне третья гармоника, вообще говоря, не обнаруживается, поэтому оценивать её в этом случае необязательно;

5) наиболее чувствительным к частоте возмущения параметром динамической системы является ускорение, что является естественным, ибо оно есть произведение амплитуды составляющей перемещения системы на квадрат частоты.

Таким образом, использование как приближённых аналитических, так и численных методов в сочетании со спектральным анализом, позволяет более детально исследовать динамику нелинейных механических систем.

Библиографический список

1. Щипанов Г. В. Теория и методы построения автоматических регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1939. № 1. С. 4–37.
2. Лузин Н. Н. К изучению матричной теории дифференциальных уравнений. // Автоматика и телемеханика. 1940. № 5. С. 4–66.
3. Петров Б. Н. О реализуемости условий инвариантности // Теория инвариантности и ее применение в автоматических системах: тр. 1-го Всесоюз. совещания по теории инвариантности, состоявшегося в Киеве 16–20 окт. 1958 г. Москва: Изд-во АН СССР, 1959. С. 59–80.
4. Алабужев П. М., Гритчин А. А., Ким Л. И. [и др.]. Виброзащитные системы с квази нулевой жесткостью / под ред. К. М. Рагульскиса. Ленинград: Машиностроение, 1986. 100 с.
5. Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. Synthesis of invariant vibroprotection system (theory and practice) // Nonlinear vibration problems: proceedings of Twelve International Scientific Conference. Warszawa: DWH-Polish Scientific Publishers, 1993. Vol. 25. P. 224–236.
6. Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н., Галуза Ю. Ф., Поляков С. Н. Активная система виброизоляции с экстремальным регулятором // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 37–40.
7. Нехаев В. А., Николаев В. А., Закерничная Н. В., Баглайчук С. В. Виброзащита человека-оператора на основе применения принципа регулирования по возмущению // Проблемы машиностроения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. / науч. ред. П. Д. Балакин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 93–97. ISBN 978-5-8149-2600-5.
8. Николаев В. А., Нехаев В. А. Динамика системы с компенсирующей связью и релаксационным трением // Проблемы механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. Т. 1. P. 274–277. ISBN 978-5-60418668-1-7.
9. Рыбак Л. А., Синев А. В., Пашков А. И. Синтез активных систем виброизоляции на космических объектах. Москва: Янус-К, 1997. 159 с.
10. Каннингхэм, В. Введение в теорию нелинейных систем (перевод с английского). Москва: Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. 456 с.
11. Крюков Б. И. Вынужденные колебания существенно нелинейных систем. Москва: Машиностроение, 1984. 216 с.
12. Кузнецов Н. В. Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 5. С. 5–27. DOI: 10.1134/S1064230720050093.
13. Бидерман В. Л. Прикладная теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. — Москва: Высшая школа, 1972. — 416 с.
14. Каудерер Г. Нелинейная механика. Москва: Изд-во иностранной литературы, 1961. 778 с.
15. Коловский М. З. Нелинейная теория виброзащитных систем. Москва: Наука, 1966. 320 с.
16. Магнус К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем. Москва: Мир, 1982. 304 с.
17. Неймарк Ю. И. Математическое моделирование как наука и искусство. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2010. 420 с. ISBN 978-5-91326-145-8.
18. Бендатт Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / пер. с англ. Г. В. Матушевского, В. Е. Приваловского. Москва: Мир, 1971. 408 с.

НЕХАЕВ Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Омского

государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 8041-9292

AuthorID (РИНЦ): 394940

Адрес для переписки: nehaevVA@omgups.ru

НИКОЛАЕВ Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 2398-9007

AuthorID (РИНЦ): 395978

Адрес для переписки: nikolaevVA@omgups.ru

СМАЛЕВ Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5336-2324

AuthorID (РИНЦ): 651442

Адрес для переписки: SmalevAN@yandex.ru

СЕРЯКОВ Кирилл Олегович, аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 9535-4229

AuthorID (РИНЦ): 1119026

Адрес для переписки: kirillseryakov@gmail.com

Для цитирования

Нехаев В. А., Николаев В. А., Смалев А. Н., Серяков К. О. Исследование динамики механической системы с нелинейным упругим подвесом и спектральный анализ результатов // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 15–22. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-15-22.

Статья поступила в редакцию 06.04.2023 г.

© В. А. Нехаев, В. А. Николаев, А. Н. Смалев,
К. О. Серяков

DYNAMICS OF A MECHANICAL SYSTEM WITH NONLINEAR ELASTIC SUSPENSION AND SPECTRAL ANALYSIS OF THE RESULTS

The article considers the dynamics of a nonlinear mechanical system under the action of a kinematic perturbation on it. The object's vibration isolation system is described by a rigid cubic power characteristic and is based on compensation of external perturbations — the introduction of an additional elastic element with negative stiffness into the suspension. Numerical modeling of the system is performed, the results of which are analyzed by the method of spectral analysis, based on the representation of the correlation function on a small time interval by a square polynomial.

As a result of the analysis, it is found that in the pre-resonant and resonant regions, the general solution should consist of three components: a subharmonic of the order of $1/3$, the fundamental harmonic, and the third harmonic. It is noted that only the subharmonic of the order of $1/3$ and the fundamental harmonic are important in the resonant zone.

It is also noted that even simple nonlinear mechanical systems in the study of dynamics should use approximate analytical and numerical methods in combination with spectral analysis, since traditional methods of nonlinear mechanics are not adapted to solving problems taking into account a relatively large number of harmonic components that appear due to nonlinearity.

Keywords: mechanical system, rigid cubic force characteristic, Duffing equation, approximate analytical methods, mathematical modeling, spectral density (power), subharmonics, frequency response.

References

1. Shchipanov G. V. Teoriya i metody postroeniya avtomaticheskikh regulyatorov [Theory and methods of construction of automatic regulators] // *Avtomatika i telemekhanika. Automation and Telemechanics*. 1939. No. 1. P. 4–37. (In Russ.).
2. Luzin N. N. K izucheniyu matrichnoj teorii differentsial'nykh uravnenij [To the study of the matrix theory of differential equations] // *Avtomatika i telemekhanika. Automation and Telemechanics*. 1940. No. 5. P. 4–66. (In Russ.).
3. Petrov B. N. O realizuyemosti usloviy invariantnosti [On the feasibility of invariance conditions] // *Teoriya invariantnosti i yeye primeneniye v avtomaticheskikh sistemakh. The Theory of Invariance and its Application in Automatic Systems*. Moscow, 1959. P. 59–80. (In Russ.).
4. Alabuzhev P. M., Gritchin A. A., Kim L. I. [et al.]. Vibrozashchitnyye sistemy s kvazinulevoy zhestkost'yu [Vibration protection systems with quasi-zero stiffness] / ed. by K. M. Ragul'skisa. Leningrad, 1986. 100 p. (In Russ.).
5. Nekhaev V. A., Nikolaev V. A. Synthesis of invariant vibroprotection system (theory and practice) // *Nonlinear vibration problems: proceedings of Twelve International Scientific Conference*. Warszawa: DWH-Polish Scientific Publishers, 1993. Vol. 25. P. 224–236. (In Engl.).

6. Buryan Y. A., Sorokin V. N., Galuza Y. F., Polyakov S. N. Aktivnaya sistema vibroizolyatsii s ekstremal'nym regulyatorom [Active vibration isolation system with extreme control] // *Vestnik mashinostroeniya. Bulletin of Mechanical Engineering*. 2015. No. 2. P. 37–40. (In Russ.).
7. Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Zakernichnaya N. V., Baglaichuk S. V. Vibrozashchita cheloveka-operatora na osnove primeneniya principa regulirovaniya po vozmushcheniyu [Vibration protection of a human operator based on the application of the principle of regulation by perturbation] // *Problemy mashinovedeniya. Mechanical Science and Technology Update*. Omsk, 2018. P. 93–97. ISBN 978-5-8149-2600-5. (In Russ.).
8. Nikolaev V. A., Nekhaev V. A. Dinamika sistemy s kompensiruyushchej svyaz'yu i relaksatsionnym treniem [Dynamics system with compensating and oscillation damper with spring] // *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin. Issues on Modern Machines Mechanics*. Ulan-Ude, 2018. Vol. 1. P. 274–277. ISBN 978-5-6041868-1-7. (In Russ.).
9. Rybak L. A., Sinev A. V., Pashkov A. I. Sintez aktivnykh sistem vibroizolyatsii na kosmicheskikh ob"ektakh [Synthesis of active vibration isolation systems on space objects]. Moscow, 1997. 159 p. (In Russ.).
10. Cunningham V. J. Introduction to nonlinear analysis. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1958. 349 p. (In Engl.).

11. Kryukov B. I. Vynuzhdennye kolebaniya sushchestvenno nelinejnyh sistem [Forced oscillations of essentially nonlinear systems]. Moscow, 1984. 216 p. (In Russ.).
12. Kuznetsov N. V. Theory of hidden oscillations and stability of control systems // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2020. Vol. 59, no. 5. P. 647–668. (In Engl.).
13. Biderman V. L. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebanij [Applied theory of mechanical vibrations]. Moscow, 1972. 416 p. (In Russ.).
14. Kauderer G. Nelinejnaya mekhanika [Nonlinear mechanics]. Moscow, 1961. 778 p. (In Russ.).
15. Kolovsky M. Z. Nelinejnaya teoriya vibrozashchitnyh sistem [Nonlinear theory of vibration protection systems]. Moscow, 1966. 320 p. (In Russ.).
16. Magnus K. Kolebaniya: Vvedenie v issledovanie kolebatel'nyh sistem [Introduction to the study of oscillatory systems]. Moscow, 1982. 304 p. (In Russ.).
17. Neumark Yu. I. Matematicheskoe modelirovanie kak nauka i iskusstvo [Mathematical modeling as science and art]. Nizhny Novgorod, 2010. 420 p. ISBN 978-5-91326-145-8 (In Russ.).
18. Bendatt Dzh., Pirsol A. Izmereniye i analiz sluchaynykh protsessov [Measurement and analysis of random processes] / trans. from Engl. G. V. Matushevskogo, V. E. Privalovskogo. Moscow, 1971. 408 p. (In Russ.).

NEKHAEV Victor Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Theoretical and Applied Mechanics Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.
SPIN-code: 8041-9292

AuthorID (RSCI): 394940

Correspondence address: nehaevVA@omgups.ru

NIKOLAEV Victor Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical and Applied Mechanics Department, OSTU, Omsk.

SPIN- code: 2398-9007

AuthorID (RSCI): 395978

Correspondence address: nikolaevVA@omgups.ru

SMALOV Aleksandr Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Theoretical and Applied Mechanics Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 5336-2324

AuthorID (RSCI): 651442

Correspondence address: SmalovAN@yandex.ru

SERYAKOV Kirill Olegovich, Graduate Student of Theoretical and Applied Mechanics Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 9535-4229

AuthorID (RSCI): 1119026

Correspondence address: kirillseryakov@gmail.com

For citations

Nekhaev V. A., Nikolaev V. A., Smalov A. N., Seryakov K. O. Dynamics of a mechanical system with nonlinear elastic suspension and spectral analysis of the results // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 15–22. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-15-22.

Received April 06, 2023.

© V. A. Nekhaev, V. A. Nikolaev, A. N. Smalov,
K. O. Seryakov

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ НЕЛИНЕЙЧАТЫЕ КВАДРИКИ ВРАЩЕНИЯ

В работе рассмотрено формообразование циклических поверхностей на основе нелинейного вращения, у которых осью вращения и образующей линией в общем случае служат пространственные гладкие кривые. В качестве инструмента формообразования поверхностей нелинейного вращения используется известный в дифференциальной геометрии кривых линий метод сопровождающего трехгранника Френе. Геометрическая схема формообразования поверхностей основана на конструкции, в которую входят: криволинейная ось вращения и однопараметрическое множество ее нормальных плоскостей; образующая линия, точки которой описывают в нормальных плоскостях круговые траектории с центрами на криволинейной оси. Приведена математическая модель формообразования поверхности нелинейного вращения для общего случая задания оси вращения и образующей линии. На основе этой модели рассмотрены тестовые примеры формообразования поверхностей нелинейного вращения, представляющих собой циклические поверхности, каждая из которых сопровождается соответствующую нелинейчатую квадрику вращения. В примерах формообразования исходная прямолинейная ось нелинейчатой квадрики вращения и ее образующая линия — кривая второго порядка, функционально меняются местами: осью вращения становится кривая второго порядка, а образующей линией — прямолинейная ось. Полученное семейство поверхностей нелинейного вращения принадлежит известному в теории аналитических поверхностей классу «Нормальные циклические поверхности». Оно дополняет этот класс и принципиально отличается по методу формообразования.

Ключевые слова: нелинейное вращение, циклические поверхности, нелинейчатые квадрики вращения, ось вращения, образующая линия.

Введение. В теории аналитических поверхностей известен класс нормальных циклических поверхностей (НЦП) с геометрической схемой формообразования, включающей: плоскую или винтообразную линию центров окружностей, образующих поверхность, и закон изменения радиусов этих окружностей при переходе от одной нормальной плоскости линии центров к другой [1–3]. Однако полного решения задачи формообразования НЦП на основе пространственной линии центров в общем случае не дано. Известно несколько работ, в которых используются различные подходы к решению этой задачи. Так, например, в работах [4, 5] предложен подход с использованием аппарата конструктивного моделирования циклических поверхностей на основе квазивращения относительно кривых второго порядка. Метод сопровождающего трехгранника в этом подходе не используется, обобщение конструктивного моделирования на случай пространственной оси квазивращения не делается. В работах [6, 7] рассматривается алгебраический подход для построения обобщенной поверхности вращения

на основе функций, определяющих взаимосвязь геометрии линии центров и линии радиусов, формирующих «круговую» траекторию движения точки в форме кривой второго порядка. В работах этого направления образования обобщенных поверхностей вращения не выполняется анализ влияния геометрии и взаимного расположения линии центров и линии радиусов на геометрию конструируемой поверхности. Циклические поверхности, в частности каналовые, широко используются на практике как динамические поверхности для транспортировки различных рабочих веществ: газов, жидкостей, сыпучих материалов. Как каналовые поверхности [8, 9] они также применяются в задачах оптимального размещения этих поверхностей в ограниченных и сложноорганизованных средах [10, 11]. Они часто используются при формообразовании пространственных инженерных конструкций и сооружений [12], в архитектуре зданий и конструкциях технических изделий [13]. Очевидно, для дальнейшего развития теории формообразования циклических поверхностей и решения актуальных практи-

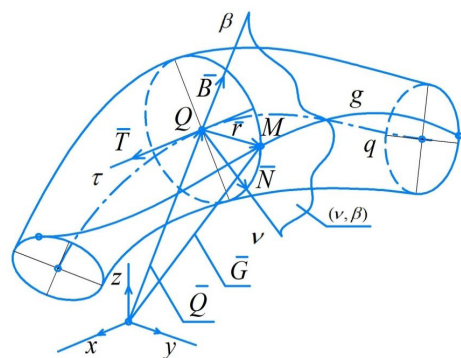


Рис. 1. Схема формообразования поверхности нелинейного вращения

ческих задач на основе их применения необходимы оригинальные подходы к разработке геометрических схем формообразования, приводящие к появлению новых семейств циклических поверхностей с их аналитическим представлением.

Постановка задачи. Заданы две пространственные гладкие кривые q и g , из которых кривая q — ось вращения (рис. 1). Требуется построить поверхность, образованную вращением линии g относительно оси q . Также требуется показать на тестовых примерах существование циклических поверхностей, сопровождающих нелинейчатые квадратики вращения. Очевидно, в решении этой задачи линия g будет служить образующей линией искомой поверхности. В качестве инструмента решения будем использовать известный в дифференциальной геометрии кривых линий метод сопровождающего трехгранника Френе, достаточно обстоятельно изложенный в известных работах В. Бляшке [14], Э. Картана [15], Д. Н. Зейлигера [16] и др. геометров. Отметим также работы отечественных исследователей, успешно применивших этот метод в области инженерной геометрии и ее многочисленных приложениях [8, 9, 17–21].

Геометрическая схема и математическая модель формообразования поверхности нелинейного вращения. Формообразование поверхности нелинейного вращения основано на вращении линии g относительно криволинейной оси q . При этом движении каждая точка M образующей g описывает круговую траекторию в нормальной плоскости (v, β) кривой q . Исходя из того, что нормальные плоскости оси q образуют нелинейный пучок плоскостей и образом прямой линии при ее вращении относительно q является кривая линия, будем называть образующийся объект поверхностью нелинейного вращения (ПНВ). При определенных условиях задания формы и расположения кривых q и g между ними может быть установлено соответствие, при котором каждой точке образующей g будет соответствовать одна или множество (конечное или бесконечное) нормальных плоскостей оси q .

Зададим кривые линии следующим образом:

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

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

$$g: \bar{G}(l) = \{x(l), y(l), z(l)\},$$

$$l \in [l_0, l_n] \in \mathbf{R}, \bar{G}'(l) = \frac{d\bar{G}}{dl} \neq 0.$$

Вращение точки $M \in \bar{G}(l)$ должно происходить в нормальной плоскости (v, β) оси вращения $\bar{Q}(t)$, проходящей через точку $Q \in \bar{Q}(t)$. В этой точке существует трехгранник Френе, образуемый ортами $\bar{T}(t)$, $\bar{N}(t)$ и $\bar{B}(t)$ соответственно касательной τ , главной нормали v и бинормали β , которые попарно определяют нормальную (v, β) , соприкасающуюся (τ, v) и спрямляющую (τ, β) плоскости. Принадлежность точки $M \in \bar{G}(l)$ к нормальной плоскости (v, β) можно выразить следующим уравнением:

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

Из уравнения (1) следует зависимость $l = F(t)$. Нетрудно убедиться в том, что $F'(t) = \frac{dF}{dt} \neq 0$. Из гладкости функции $F(t)$ следует гомеоморфное соответствие числовых отрезков $[l_0, l_n]$ и $[t_0, t_n]$, которое влечет такое же соответствие точек гладких кривых линий $\bar{Q}(t)$ и $\bar{G}(l)$.

Из схемы на рис. 1 следует

$$\bar{r}(t) = A(t) \cdot (\bar{G}(F(t)) - \bar{Q}(t)), \quad (2)$$

где $\bar{r}(t)$ — радиус-вектор точки образующей линии $\bar{G}(l)$ в локальной системе координат $Q\tau v\beta$, $A(t)$ — матрица перехода от неподвижной системы координат $Qxyz$ к локальной $Q\tau v\beta$ сопровождающего трехгранника. Параметрические уравнения круговой траектории точки M при $t = t_0, t_Q \in [t_0, t_n]$ имеют вид:

$$v_M(t_Q, \lambda) = r(t_Q) \cdot \cos \psi(t_Q, \lambda),$$

$$\beta_M(t_Q, \lambda) = r(t_Q) \cdot \sin \psi(t_Q, \lambda), \quad (3)$$

где $r(t_Q) = |\bar{r}(t_Q)|$, $\psi(t_Q, \lambda) = \phi(t_Q) + 2\pi \cdot \lambda$, $\lambda \in [0, 1]$.

Уравнение непрерывного семейства окружностей — траекторий точек образующей $\bar{G}(l)$ в системе координат $Qxyz$ имеет вид:

$$\bar{U}(t, \lambda) = A^{-1}(t) \cdot \bar{r}(t, \lambda) + \bar{Q}(t), \quad (4)$$

где $\bar{r}(t, \lambda) = \{\tau = 0, v(t, \lambda), \beta(t, \lambda)\}$.

Уравнение (4) описывает ПНВ с образующей линией $\bar{G}(l)$ и криволинейной осью вращения $\bar{Q}(t)$. Из уравнения (1) может быть получена также зависимость $t = \Phi(l)$, где $\Phi'(l) = \frac{d\Phi}{dl}$. В этом случае в уравнении (4) произойдет смена параметров, и ПНВ будет описываться функцией $\bar{U}(l, \lambda)$.

Результаты экспериментов. Результаты вычислений в тестовых примерах получены в системе компьютерной алгебры *Maple 18*, и их визуализация представлена в табл. 1.

Пример 1. Сфера образована вращением образующей линии g (окружность) относительно прямой оси q :

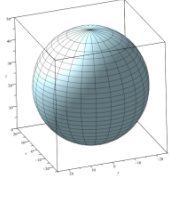
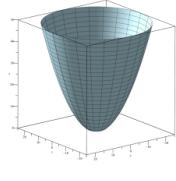
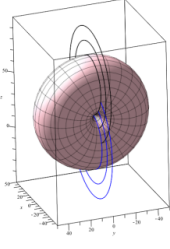
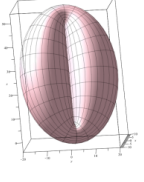
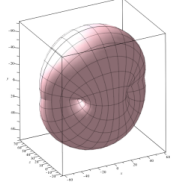
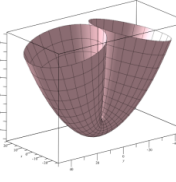
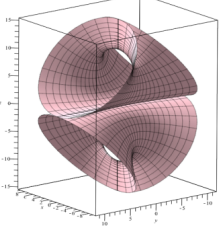
$$q: \bar{Q}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50t \end{bmatrix}, t \in [0, 1];$$

$$g: \bar{G}(l) = \begin{bmatrix} 0 \\ 25 \cos(2\pi l) \\ 25 \sin(2\pi l) + 25 \end{bmatrix}, l \in [0, 1].$$

Уравнение сферы имеет вид:

$$\bar{P}(\lambda, l) = \begin{bmatrix} 50\sqrt{-l(l-1)} \cdot \sin(2\lambda\pi) \\ -50\sqrt{-l(l-1)} \cdot \cos(2\lambda\pi) \\ 50l \end{bmatrix}$$

Сопровождающие поверхности нелинейного вращения (СПНВ) для нелинейчатых квадратик вращения (НКВ)

НКВ	Сфера	Эллипсоид		Параболоид	Гиперboloид	
		Вытянутый сфероид	Сплюснутый сфероид		Двулоостный гиперболоид	Однолоостный гиперболоид
СПНВ						

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

Требуется определить ПНВ, сопровождающую сферу. Для этих целей изменим функциональное назначение линий q и g . В качестве оси принимаем линию g , а в качестве образующей — линию q . На основании формулы (4) получаем уравнение ПНВ, которая представляет собой циклическую поверхность в форме закрытого тора и двух соответственных пучков концентрических окружностей в его осевой плоскости. Уравнение сопровождающей ПНВ имеет вид:

$$\bar{U}(l, \lambda) = \begin{bmatrix} 25 \cdot \sin(2\lambda\pi) \\ 25 \cdot \sin(\pi l) \cdot (\cos(2\lambda\pi) - 1) \\ -25 \cos(\pi l) \cdot (\cos(2\lambda\pi) + 1) + 25 \end{bmatrix}, l \in [0,1], \lambda \in [0,1].$$

Пример 2. Задан эллипсоид вращения (вытянутый сфероид)

$$\bar{P}(l, \lambda) = \begin{bmatrix} 10 \cdot \sin(2\pi l) \cdot \cos(2\lambda\pi) \\ 10 \cdot \cos(2\pi l) \cdot \sin(2\lambda\pi) \\ 25 \cdot \sin(2\pi l) + 25 \end{bmatrix}, l \in [0,1], \lambda \in [0,1]$$

с осью вращения (большая ось эллипса) q и образующей линией (большим эллипсом) g :

$$q : \bar{Q}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50t \end{bmatrix}, t \in [0,1].$$

$$g : \bar{G}(l) = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \cos(2\pi l) \\ 25 \sin(2\pi l) + 25 \end{bmatrix}, l \in [0,1].$$

Требуется определить сопровождающую ПНВ. Изменим функционально роли линий q и g . Используя формулу (4), получим уравнение ис-

комой ПНВ, которое представим, ввиду его громозкости, также лишь в обобщенном виде: $\bar{U}(l, \lambda) = (x(l, \lambda), y(l, \lambda), z(l, \lambda)), l \in [0,1], \lambda \in [0,1]$. Визуализация полученной ПНВ представлена в таблице.

Пример 3. Задан эллипсоид вращения (сплюснутый сфероид)

$$\bar{P}(l, \lambda) = \begin{bmatrix} 50 \cdot \sqrt{-l^2 + 1} \cdot \sin(2\pi l) \\ 10 \cdot (1 - 20l) \\ -50 \cdot \sqrt{-l^2 + 1} \cdot \cos(2\pi l) + 25 \end{bmatrix}, l \in [0,1], \lambda \in [0,1]$$

с осью вращения (малая ось эллипса) q и образующей линией (большим эллипсом) g :

$$q : \bar{Q}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 10(1 - 2t) \\ 50t \end{bmatrix}, t \in [0,1].$$

$$g : \bar{G}(l) = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \cos(2\pi l) \\ 25 \sin(2\pi l) + 25 \end{bmatrix}, l \in [0,1].$$

Изменяя функциональные роли линий q и g и используя формулу (4), получим уравнение ПНВ, которое также можем представить лишь в обобщенном виде: $\bar{U}(l, \lambda) = (x(l, \lambda), y(l, \lambda), z(l, \lambda)), l \in [0,1], \lambda \in [0,1]$. Полученная ПНВ представлена в табл 1.

Пример 4. Для параболоида, заданного уравнением

$$\bar{P}(l, \lambda) = \begin{bmatrix} -25\sqrt{l} \sin(2\lambda\pi) \\ 25\sqrt{l} \cos(2\lambda\pi) \\ 50l \end{bmatrix}, l \in [0,1], \lambda \in [0,1],$$

его ось вращения и образующая описываются соответственно уравнениями:

$$q : \bar{Q}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50t \end{bmatrix}, t \in [0,1],$$

$$g: \bar{G}(l) = \begin{bmatrix} 0 \\ -25(2l+1) \\ -50(2l-1)^2 \end{bmatrix}, l \in [0,1].$$

Определим для параболоида его сопровождающую *ПНВ*. Как и в предыдущих примерах, изменим вначале функциональные роли линий q и g , а затем, на основе формулы (4), определим уравнение искомой *ПНВ*. Ввиду громоздкости уравнение также не приводится. Результат визуализации сопровождающей *ПНВ* приведен в таблице.

Пример 5. Поверхность двуполостного гиперболоида вращения задана уравнением

$$\bar{P}(l, \lambda) = \begin{bmatrix} \frac{5}{2}(e^{-2l+1} - e^{2l-1}) \cos(2\lambda\pi) \\ \frac{5}{2}(e^{-2l+1} - e^{2l-1}) \sin(2\lambda\pi) \\ \pm \frac{5}{2}(e^{-2l+1} + e^{2l-1}) \end{bmatrix},$$

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

Его ось вращения (действительная ось гипербола) и образующая (гипербола) имеют соответственно уравнения:

$$q: \bar{Q}(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50t \end{bmatrix}, t \in [0,1],$$

$$g: \bar{G}(l) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{5}{2}(e^{-2l+1} - e^{2l-1}) \\ \pm \frac{5}{2}(e^{-2l+1} + e^{2l-1}) \end{bmatrix}, l \in [0,1].$$

Определим *ПНВ*, соответствующую гиперболоиду. В результате вычислений на основе формулы (4) получим векторно-параметрическое уравнение, которое по причине громоздкости также не приводится. Визуализация полученной поверхности приведена в таблице. Рассматривая в качестве исходной поверхность однополостного гиперболоида вращения и выполняя соответствующие вычисления, получим сопровождающую его *ПНВ*, совпадающую с *ПНВ* для двуполостного гиперболоида.

Обсуждение результатов. Анализ полученных циклических поверхностей, сопровождающих нелинейные квадрики вращения, показывает их принадлежность к классу алгебраических поверхностей четвертого порядка. Наличие двух соответственных усеченных пучков концентрических окружностей в примере 1 обусловлено геометрией и взаимным расположением образующей (отрезок прямой) и оси вращения (окружность) образуемой *ПНВ*. В примере 4 вычислениями установлено совпадение двух *ПНВ*, одна из которых получена вращением действительной оси гипербола относительно самой гипербола, а другая — мнимой оси относительно той же гипербола. Для *ПНВ*, полученных в примерах, характерна замкнутость этих поверхностей. В примерах 1 и 2 она имеет явный характер. В примере 3 замыкание происходит по несобственной окружности, т.е. по окружности с бесконечно удаленным центром и бесконечно большого радиуса. В качестве такой окружности принимается несобственная прямая в плоскости оси вращения — парабола. В примере 4 происходит двойное замыкание

сопровождающей *ПНВ* — по несобственной окружности с бесконечно удаленным центром в направлении одной асимптоты гипербола, служащей осью вращения, и по несобственной окружности с бесконечно удаленным центром в направлении другой её асимптоты.

Заключение

1. *ПНВ*, сопровождающие нелинейчатые квадрики вращения, принадлежат известному в теории аналитических поверхностей классу нормальных циклических поверхностей и являются замкнутыми поверхностями с замыканием некоторых из них в расширенном евклидовом пространстве.

2. Предложенный подход к формообразованию нормальных циклических поверхностей, сопровождающих нелинейчатые квадрики вращения, дополняет известную в инженерной геометрии классификацию циклических поверхностей.

3. Актуальными для последующих исследований могут быть задачи установления соответствия геометрий поверхностей нелинейчатых квадрик вращения и сопровождающих их *ПНВ*, а также количественной множественности *ПНВ* для нелинейчатой квадрики вращения.

Библиографический список

1. Кривошапко С. Н., Иванов В. Н. Энциклопедия аналитических поверхностей: более 500 поверхностей, 38 классов: математикам, инженерам, архитекторам. Москва: URSS, 2010. 556 с. ISSN 1815-5235; 978-5-397-00985-0.
2. Кривошапко С. Н., Иванов В. Н. Классификация циклических поверхностей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. № 2. С. 25–34.
3. Krivoshapko S., Hyeng C. Geometrical research of rare types of cyclic surfaces // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2012. Vol. 12 (3). P. 346–359.
4. Беглов И. А., Рустамян В. В. Метод вращения геометрических объектов вокруг криволинейной оси // Геометрия и графика. 2017. № 3. С. 45–50. DOI: 10.12737/article_59bfa4eb0bf488.99866490.
5. Beglov I. A. Computer geometric modeling of quasi-rotation surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1901. P. 16–17. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057.
6. Григорьев М. И. Построение обобщенных поверхностей вращения // Семинар «DNA&CAGD». Избранные доклады. 2007. С. 1–7.
7. 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.
8. Осипов В. А. Машинные методы проектирования непрерывнокаркасных поверхностей. Москва: Машиностроение, 1979. 248 с.
9. Осипов В. А., Осипова Л. И. Теоретические основы каркасно-кинематического метода направляющей линии // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1980. № 4. С. 48–53.
10. Маркин А. В., Корн Г. В., Куи М. Х. [и др.]. Дискретные модели геометрического моделирования компоновки авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. 16 с. EDN VUDSTD.
11. Хгун Н. Н. Разработка и исследование рецепторных геометрических моделей телесной трассировки: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Москва, 2014. 26 с.
12. 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.
13. Иванов В. Н., Рынкoвская М. И. Применение циклических поверхностей в архитектуре зданий, конструкций и из-

делий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2015. № 3. С. 111–119.

14. 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.

15. Карташ Э. Теория конечных непрерывных групп и дифференциальная геометрия, изложенные методом подвижного репера / пер. с фр. С. П. Финикова. Волгоград: Изд-во Платон, 1998. 368 с.

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

17. 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.

18. 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.

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

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

21. 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.

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

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

SPIN-код: 8144-6370

AuthorID (РИНЦ): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

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

Для цитирования

Панчук К. Л., Мясоедова Т. М., Любчинов Е. В. Циклические поверхности, сопровождающие нелинейчатые квадрати вращения // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-23-29.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023 г.

© К. Л. Панчук, Т. М. Мясоедова,

Е. В. Любчинов

CYCLIC SURFACES ACCOMPANYING NON-RULED QUADRICS OF ROTATION

The paper considers the shaping of cyclic surfaces based on nonlinear rotation, in which the axis of rotation and the generatrix in the general case are three-dimensional smooth curves. As a tool for shaping surfaces of non-linear rotation, the method of the accompanying Frenet trihedron, known in the differential geometry of curved lines, is used. The geometric scheme of surface shaping is based on a construction that includes: a curvilinear axis of rotation and a one-parameter set of its normal planes; a generatrix whose points describe in normal planes circular trajectories centered on a curvilinear axis. A mathematical model of shaping the surface of non-linear rotation for the general case of specifying the axis of rotation and the generatrix is given. On the basis of this model, test examples of the formation of surfaces of nonlinear rotation, which are cyclic surfaces, each of which accompanies the corresponding nonlinear quadric of rotation, are considered. In the examples of shaping, the original rectilinear axis of a non-linear quadric of revolution and its generating line, a second-order curve, are functionally interchanged: the second-order curve becomes the rotation axis, and the rectilinear axis becomes the generatrix.

The resulting family of surfaces of non-linear rotation belongs to the well-known class in the theory of analytic surfaces "Normal cyclic surfaces". It complements this class and fundamentally differs in the method of shaping.

Keywords: non-linear rotation, cyclic surfaces, non-ruled quadrics of rotation, axis of rotation, generatrix.

References

1. Krivoshapko S. N., Ivanov V. N. Entsiklopediya analiticheskikh poverkhnostey: boleye 500 poverkhnostey, 38 klassov: matematikam, inzheneram, arkhitektoram [Encyclopedia of analytical surfaces: more than 500 surfaces, 38 classes: for mathematicians, engineers, architects]. Moscow, 2010. 556 p. ISSN 1815-5235; 978-5-397-00985-0. (In Russ.).
2. Krivoshapko S. N., Ivanov V. N. Klassifikatsiya tsiklicheskikh poverkhnostey [Classification of cyclic surfaces] // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2006. No. 2. P. 25–34. (In Russ.).
3. Krivoshapko S., Hyeng C. Geometrical research of rare types of cyclic surfaces // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2012. Vol. 12 (3). P. 346–359. (In Engl.).
4. Beglov I. A., Rustamyan V. V. Metod vrashcheniya geometricheskikh ob'yektov vokrug krivolineynoy osi [Method of rotation of geometrical objects around the curvilinear axis] // Geometriya i grafika. *Geometry and Graphics*. 2017. No. 3. P. 45–50. DOI: 10.12737/article_59bfa4eb0bf488.99866490. (In Russ.).
5. Beglov I. A. Computer geometric modeling of quasi-rotation surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 16–17. DOI: 10.1088/1742-6596/1901/1/012057. (In Engl.).
6. Grigor'yev M. I. Postroyeniye obobshchennykh poverkhnostey vrashcheniya [Construction of generalised rotation surfaces] // Seminar «DNA&CAGD». Izbrannyye doklady. *Seminar «DNA&CAGD». Izbrannyye Doklady*. 2007. P. 1–7. (In Russ.).
7. Grigor'yev M. I., Malozemov V. N. Sostavnyye krivyie 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.).
8. Osipov V. A. Mashinnyye metody proyektirovaniya nepreryvnokarkasnykh poverkhnostey [Machine-assisted design methods for continuous frame surfaces]. Moscow, 1979. 248 p. (In Russ.).
9. Osipov V. A., Osipova L. I. Teoreticheskiye osnovy karkasno-kinemacheskogo metoda napravlyayushchey linii [Theoretical foundations of the frame-kinematic method of the guide line] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. *Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Aviatsionnaya Tekhnika*. 1980. No. 4. P. 48–53. (In Russ.).
10. 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.).
11. 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.).
12. Ivanov V. N., Shmeleva A. A. Geometriya i formoobrazovaniye tonkostennykh prostranstvennykh konstruksiy 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 konstruksiy i sooruzheniy. *Structural Mechanics of*

Engineering Constructions and Buildings. 2016. No. 6. P. 3–8. (In Russ.).

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

14. 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.).

15. 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. Volgograd, 1998. 368 p. (In Russ.).

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

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

18. 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.).

19. 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. (In Russ.).

20. 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. (In Russ.).

21. 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.).

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

SPIN-code: 5623-0008

AuthorID (RSCI): 501163

ORCID: 0000-0001-9302-8560

AuthorID (SCOPUS): 55857766100

ResearcherID: S-2788-2017

Correspondence address: Panchuk_KL@mail.ru

MYASOEDOVA Tatyana 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

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

SPIN-code: 8144-6370

AuthorID (RSCI): 917932

ORCID: 0000-0003-2499-4866

AuthorID (SCOPUS): 57199399265

ResearcherID: D-1882-2019

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

For citations

Panchuk K. L., Myasoedova T. M., Lyubchinov E. V. Cyclic surfaces accompanying non-ruled quadrics of rotation // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-23-29.

Received May 11, 2023.

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

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И СТРУКТУРЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В работе разработан алгоритм определения требуемых диагностических параметров и показателей работы мобильных энергетических средств (МЭС), реализующий усовершенствованную авторами методику бестормозных исследований двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и движущегося МЭС при переходном процессе их разгона. Впервые показана закономерность записи, обработки данных с первичных преобразователей и последовательности расчета параметров модели, с возможностью учета особенностей переходных процессов разгона коленчатого вала ДВС и МЭС. Таким образом, разработанный алгоритм и структура программного обеспечения способны реализовать предложенную авторами методику бестормозных исследований двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и движущегося МЭС. Для фиксации требуемых параметров с первичных преобразователей предложено применять известные программы CoolEdit2000 v.1.0.2374 и VisualGPS v.4.2.105.1. В статье подробно описан каждый процесс работы алгоритма, отражен порядок работы с первичной информацией и способами повышения точности расчетов.

Ключевые слова: диагностика транспорта, бестормозные испытания, тяговая динамика, оценка динамичности, мощность двигателя, автоматизация диагностирования.

Введение. Современные мобильные энергетические средства активно совершенствуются и используются во многих отраслях народного хозяйства от сельского хозяйства [1], лесозаготовки [2] до транспортировки грузов [3]. Большое внимание в этом направлении уделяется цифровизации различных процессов и технологиям интеллектуального управления. Весь этот парк техники нуждается в хорошо организованной системе технического обслуживания и ремонта. Как известно, диагностирование является неотъемлемой ее частью, цифровизация позволяет повышать его качество и внедрять технологии интеллектуального управления надежностью сложных технических систем. Поэтому разработка простых и доступных методов диагностирования различных параметров состояния МЭС и определения показателей их работы является актуальной задачей.

Постановка задачи. Как известно, существующие методы диагностирования параметров технического состояния и показателей работы МЭС разнообразны. Одним из перспективных и малоза-

тратных является бестормозной метод, основанный на оценке его динамических свойств [3]. Данный метод позволяет при наличии соответствующей базы данных с исходными параметрами МЭС, используя полученные данные о динамических и тяговых параметрах управлять не только надежностью системы, но и принимать опережающие управляющие решения, повышающие экономическую эффективность производства. Разработанный метод [3] основан на определении углового ускорения коленчатого вала двигателя при полной подаче топлива от минимальной стабильной скорости движения МЭС до максимальной. В данном контексте была поставлена задача разработки алгоритма работы программного обеспечения (ПО) программно-аппаратного комплекса, который позволит фиксировать данные от датчиков скорости, времени и угловой скорости коленчатого вала двигателя, затем заполнять массивы данных, рассчитывать тягово-динамические характеристики МЭС и строить кривые ускорения и свободного разгона. Также специально разработанный алгоритм должен сравнивать

Структура программного обеспечения

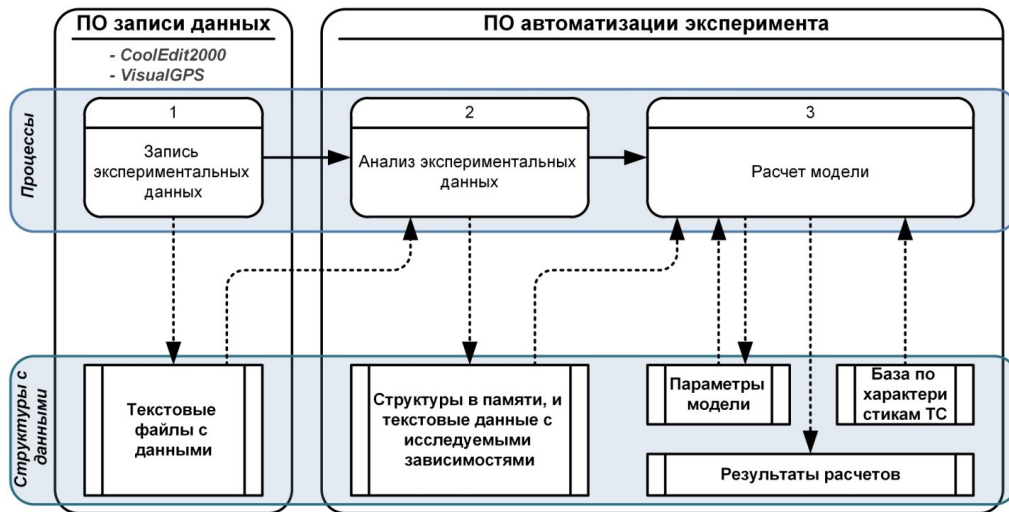


Рис. 1. Структура программного обеспечения ПАК

и анализировать эталонные характеристики МЭС с экспериментальными, давать прогноз технического состояния и рекомендации по ТО и/или оптимизации показателей работы. Алгоритм должен работать на основе итерационного метода.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи было использовано графическое структурное и функциональное моделирование предлагаемого программного обеспечения автоматизации эксперимента с использованием упрощенной нотации IDEF0, DFD и блок-схемами алгоритмов [4, 5].

Выполняемые на определенном этапе функции (процессы) обозначаются прямоугольниками с закругленными краями. Каждый «процесс» имеет свой номер, например, «3.1» или «5». Детализировались процессы номерами, например, с номером «5», а подпроцессы имеют нумерацию «5.1», «5.2», «5.3» и т.д. Структуры данных, с которыми оперируют процессы, обозначены прямоугольниками с двумя дополнительными вертикальными полосами по краям. Это могут быть базы данных, файлы на жестком диске, переменные, массивы в памяти программы. Характерными стрелками показаны последовательности выполнения процессов и их взаимодействие со структурами данных.

Результаты. При первом приближении в предлагаемой структуре ПО автоматизации экспериментальных исследований по диагностированию технического состояния МЭС и определению отдельных показателей его работы условно выделено три основных процесса:

- запись экспериментальных данных;
- анализ экспериментальных данных;
- моделирование (расчет модели).

Разработанная диаграмма процессов автоматизации эксперимента определяет место разрабатываемого ПО (рис. 1). Также на рисунке предварительно выделены структуры данных, которые используются внутри ПО.

Запись экспериментальных данных, сбор информации с внешних источников сигнала и запись этих данных в файлы осуществлялась с использованием стандартного программного обеспечения, в нашем случае информацию с GPS приемника записывает ПО VisualGPS, сохраняя данные по стандарту NMEA в лог-файлы. Данные с индукционного

датчика, со звуковой карты пишутся программой CoolEdit2000 и сохраняются в текстовые файлы в соответствующем формате [6]. Анализ экспериментальных данных в данной диаграмме как процесс, включающий в себя обработку данных, запись с внешних источников сигналов, их фильтрация и выделение необходимых функциональных зависимостей (линейная скорость МЭС и угловая скорость коленчатого вала двигателя от времени) [3].

Расчет модели — процесс итерационного вычисления параметров МЭС с целью определения параметров исследуемого МЭС с помощью выбранного математического метода.

Рассматривая структуры с данными, выделим следующие элементы диаграммы, используемые с целью автоматизации работы ПАК для диагностики:

— текстовые файлы с данными, записанными логами NMEA и сигналом индукционного датчика;

— структуры в памяти и текстовые данные с исследуемыми зависимостями — результат работы процесса «2» (рис. 1), выделенные из экспериментальных данных, зависимости действительной скорости МЭС и угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя от времени. Эти данные хранятся как в оперативной памяти программы, так и могут быть сохранены на жесткий диск в виде текстовых файлов для дальнейшей обработки в других программах;

— параметры модели — набор характеристик транспортного средства, которые необходимы для моделирования и сопоставления результатов с экспериментальными данными, к ним относятся: внешняя скоростная характеристика (ВСХ) двигателя, передаточные числа коробки перемены передач (КПП) и главной передачи (ГП), размеры колес, коэффициент сопротивления качению и аэродинамические коэффициенты; параметры модели уточняются в процессе моделирования и некоторые из них являются результатами работы модели;

— база данных по характеристикам МЭС — содержит справочник по параметрам МЭС, хранилище, из которого можно взять первоначальные параметры модели и с данными которого сравнить характеристики исследуемого автомобиля;

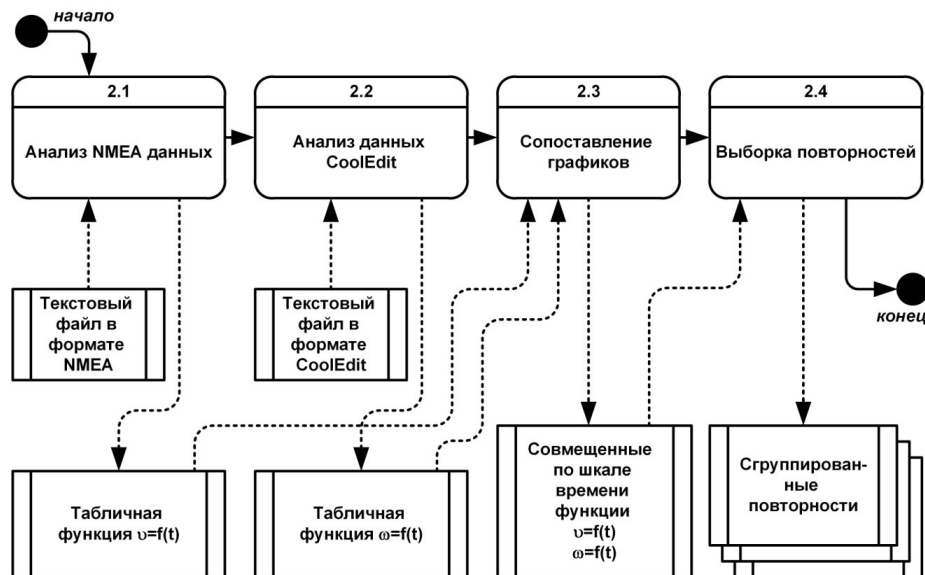


Рис. 2. Детализация процесса «2»: анализ экспериментальных данных

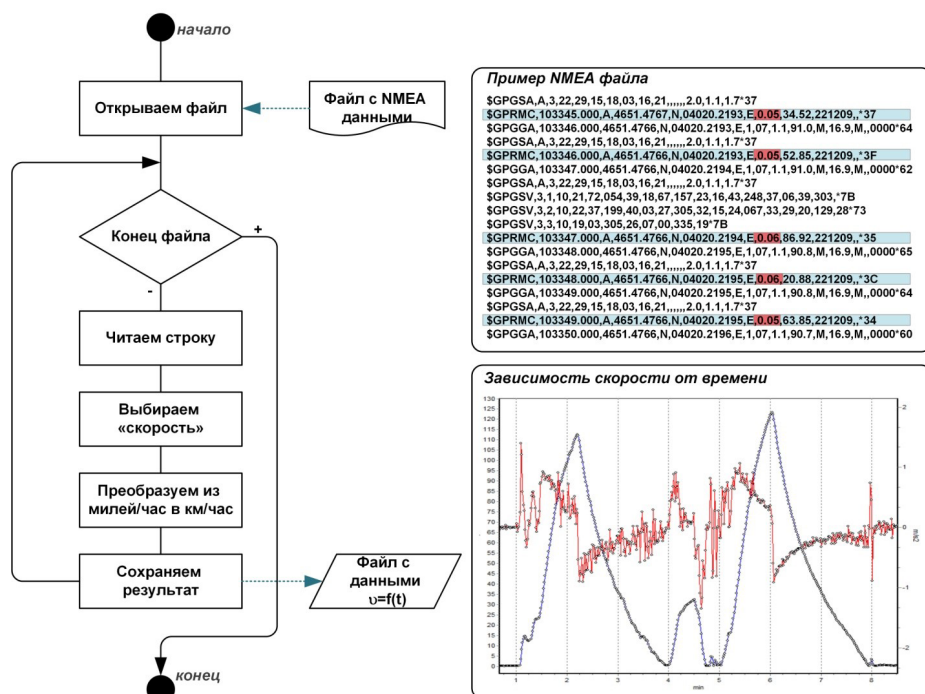


Рис. 3. Детализация процесса «2.1»: анализ NMEA данных

— результаты расчетов — ряд диагностических параметров и показателей работы МЭС, уточненных в результате итерационного моделирования: ВСХ двигателя, коэффициент сопротивления качению и аэродинамический коэффициент.

На этапе анализа экспериментальных данных (рис. 2), необходимо прочитать файлы с данными (сигналами датчиков), расшифровать сигналы, выбрать среди них «повторности эксперимента». То есть на выходе должны быть готовые данные для математического анализа — усредненные графики разгонов на разных передачах и усредненная характеристика выбега [3].

Анализ экспериментальных данных — процесс, включающий в себя:

— анализ данных GPS приемника (анализ NMEA данных), согласно [6];

— анализ и расшифровка сигнала индукционного датчика (анализ CoolEdit2000 данных) согласно [6];

— сопоставление временной оси данных GPS приемника (линейная скорость МЭС) и данных с индукционного датчика (угловая скорость коленчатого вала двигателя МЭС);

— выборка и группировка повторностей эксперимента.

Анализ NMEA данных — процесс анализа NMEA логов, выборка из файла нужных значений и формирование в памяти массива с зависимостью скорости МЭС от времени (рис. 3). В процессе анализа NMEA данных построчно читается текстовый файл, выбираются строки с маркером \$GPRMC и из этих строк — значение скорости и времени, на которое зафиксирована данная скорость.

```

SAMPLES:      43200
BITSPERSAMPLE: 16
CHANNELS:     1
SAMPLERATE:  6000
NORMALIZED:   FALSE
-78
1
-88
72
770
206
65
59
-157
-1426

```

Рис. 4. Фрагмент файла в формате CoolEdit2000

Выбранные значения записываются в оперативную память и при необходимости могут быть сохранены в виде файла на жестком диске [6].

Анализ данных CoolEdit2000 представлен процессом анализа сигнала, распознавания импульсов и формирования в памяти массива с зависимостью угловой скорости коленчатого вала двигателя от времени.

Формат файла CoolEdit2000 представляет собой обыкновенный текстовый файл, в котором построч-

но записаны уровни сигнала. В начале файла содержится шапка, в которой описываются различные характеристики, например, частота оцифровки, разрядность сигнала и количество строк в файле. На рис. 4 показан фрагмент файла в формате CoolEdit2000.

В соответствии с разработанным алгоритмом обработки данных (рис. 5) первые 5 строк читаются как «шапка файла», из которой выделяют частоту оцифровки и количество строк в файле, а после данные циклом считываются в массив в памяти программы согласно [7].

Как известно [6], для расшифровки импульсов требуется вычислить ряд специфических функций сигнала и определить для них пороговые значения для дальнейшей автоматизации вычислений.

Так как данные записываются из разных источников, разным ПО, то и привязка сигналов по времени разная и включение записи проблематично сделать одновременно, поэтому необходимо выполнение процесса «2.3» (рис. 6), т.е. необходимо произвести совмещение сигнала по оси времени. Данная операция выполняется оператором на основании характерных точек.

При реализации процесса «2.4» среди сформированного и сведенного по оси времени сигнала выбираются повторности и группируются по экспериментам: разгон на выбранной передаче или

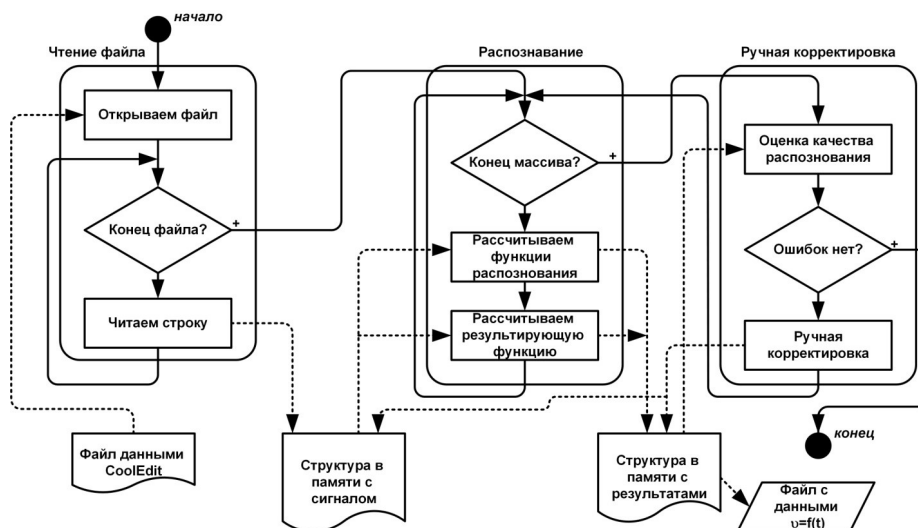


Рис. 5. Детализация процесса «2.2»: анализ данных CoolEdit2000

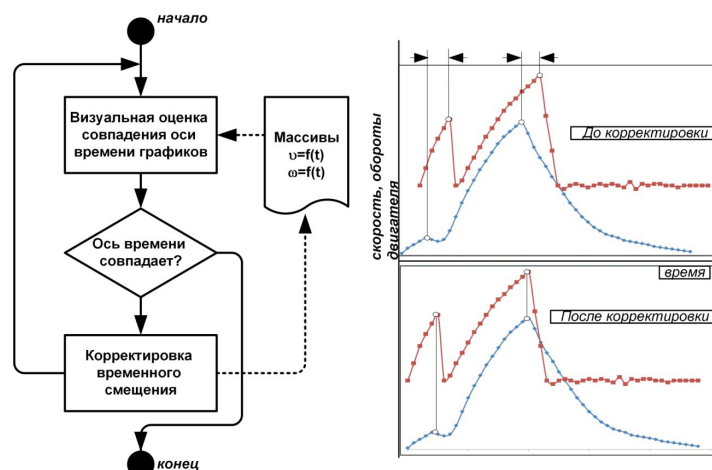


Рис. 6. Детализация процесса «2.3»: сопоставление графиков

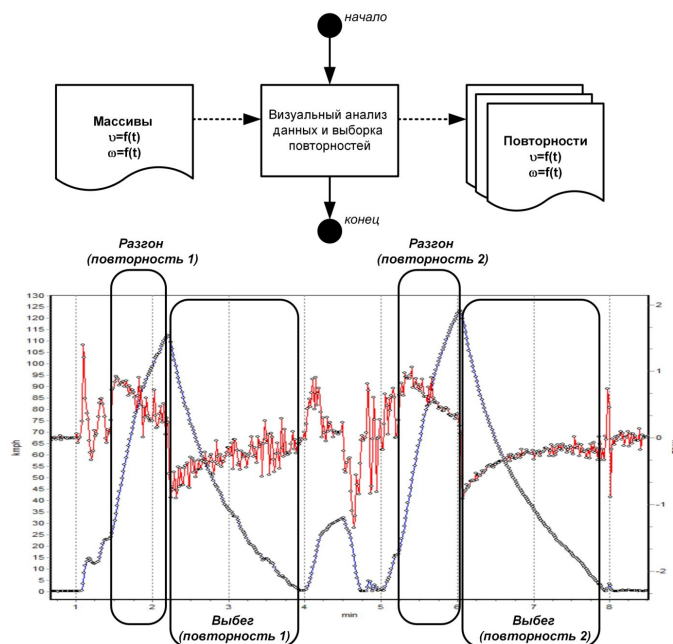


Рис. 7. Детализация процесса «2.4»: выборка повторностей

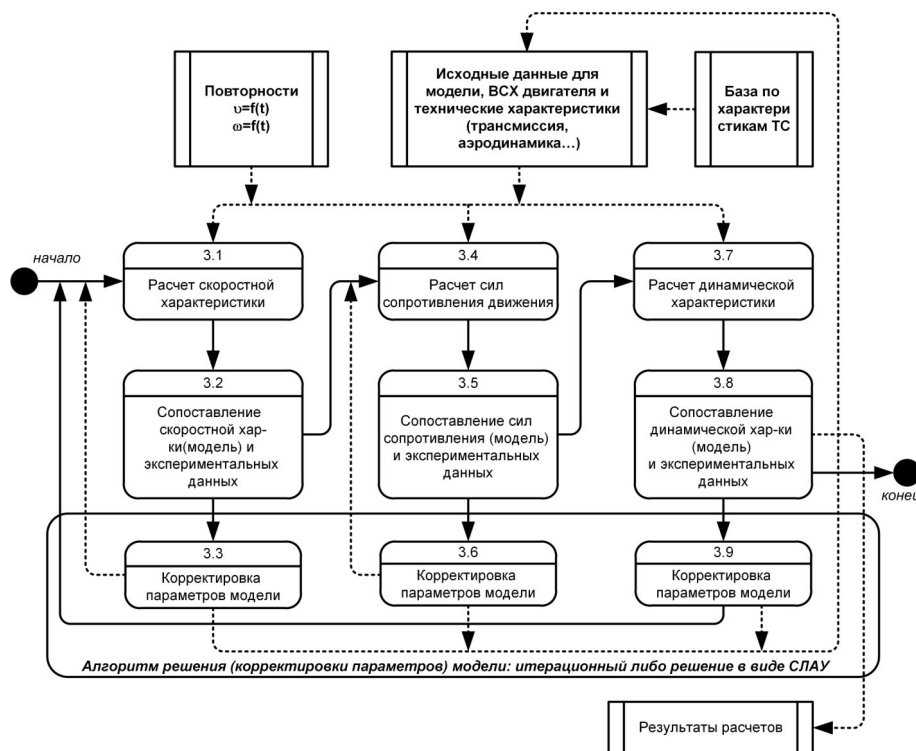


Рис. 8. Детализация процесса «3»: расчет модели

свободный выбег МЭС и т.д. (рис. 7). На форме отображаются списки проведенных экспериментов, а также массив записанных данных, на которых оператор выделяет повторности и «связывает» их с экспериментами.

В нашем случае (рис. 8) под решением модели подразумевается нахождение таких параметров модели, чтобы расчетные характеристики (сопротивление движению, динамические характеристики) модели, максимально близко совпали с экспериментальными данными.

Для решения модели, необходимо решить следующий ряд итерационных задач:

- уточнение передаточных чисел КПП и ГП, вычисление действительного радиуса качения колеса;

- вычисление коэффициентов сил сопротивления воздуха и качения;

- корректировка кривой крутящего момента двигателя. После чего решать задачу с использованием методов оптимизации линейного программирования.

Одним из оптимальных вариантов при реализации процесса «3» для искомым параметров необходимо определить допустимые диапазоны и методом перебора (метод равномерного поиска) с заданным

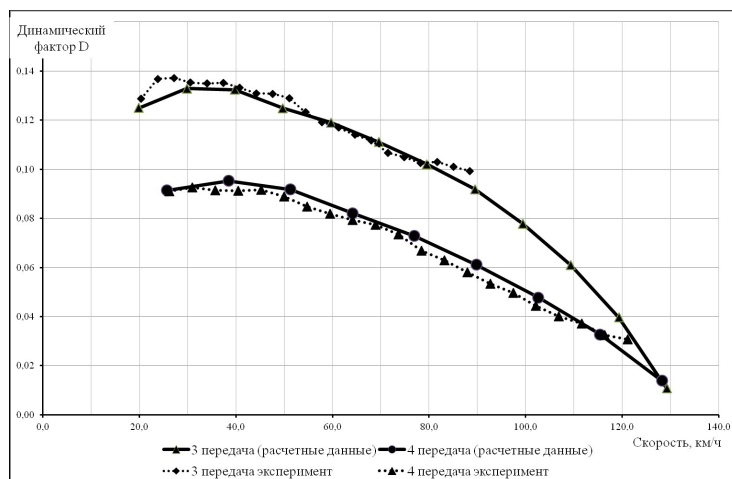


Рис. 9. Расчетная и экспериментальная динамическая характеристика МЭС

шагом найти такое соотношение параметров, при котором целевая функция будет минимальной. Второй путь предполагает взгляд на математические зависимости в модели как на систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Так как СЛАУ относится к «неточным», то его решение можно найти итерационным методом Зейделя [8, 9].

Представленный алгоритм позволил реализовать усовершенствованную авторами методику бестормозных исследований двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и движущегося МЭС при переходном процессе их разгона и получить необходимые данные, что подтверждается полученной зависимостью динамического фактора от скорости движения МЭС (рис. 9). Как известно, динамический фактор D представляет собой совокупность динамических характеристик и дает представление о динамических свойствах автомобиля при заданных дорожных условиях и нагрузке МЭС. Динамическая характеристика МЭС (рис. 9), полученная с использованием предлагаемого алгоритма и предлагаемой методики, подобна полученной стандартным расчетным методом при этом достоверная вероятность полученных закономерностей составляет не менее 95 %. Поэтому предложенную методику и алгоритм, ее реализующий, можно рекомендовать для повышения эксплуатационной надежности и эффективности при грузовых транспортных перевозках, в сельском хозяйстве и других отраслях.

Обсуждение. Разработанный алгоритм и структура применяемого ПО в совокупности с бестормозной методикой [3] позволит применять их в разных отраслях промышленности. Особенно эффективно данная разработка может быть применена для оперативного управления надежностью сложных технических систем при грузовых транспортных перевозках [10], а также, например, в сельском хозяйстве для повышения эксплуатационной надежности и эффективности МЭС [11–13].

Заключение. Таким образом, после реализации процесса «3» достигается результат поставленной задачи в определении ряда технических характеристик исследуемого МЭС, которыми являются:

- уточнённая ВСХ двигателя МЭС;
- уточненные силы сопротивления движению;
- уточненные коэффициенты учета вращающихся масс.

Как было ранее установлено [3] при апробации разработанного ПАК, а также описанный в данной

статье алгоритм и структура ПО позволили получить необходимые данные для дальнейшего совершенствования процесса автоматизации диагностирования МЭС.

Библиографический список

1. Liu C., Lin H., Li Y. [et al.]. Analysis on Status and Development Trend of Intelligent Control Technology for Agricultural Equipment // *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2020. Vol. 51, № 1. P. 1–18. DOI: 10.6041/J.ISSN.1000-1298.2020.01.001.
2. Болтнев Д. Е., Денисенко В. В., Скрыпников А. В. [и др.]. Экспериментальные и теоретические зависимости пройденного пути и расхода топлива от скорости движения автомобиля на опытных участках, имеющих различные уклоны // *Системы. Методы. Технологии*. 2021. № 3 (51). С. 105–115. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-105-115. EDN UMHNB.
3. Kazakov D. V., Kuzmenko I. P., Moskvitin A. A. Development and testing of hardware-software complex for diagnostics of freight vehicles energy parameters // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: 2020. Vol. 873 (1). 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/873/1/012027.
4. Волкова Г. Д., Новоселова О. В., Григорьев О. Г. Исследование методологий и методов проектирования автоматизированных систем различного назначения // *Электронные информационные системы*. 2014. № 2 (2). С. 57–69.
5. Integration definition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993 December 21. URL: <https://archive.org/details/federalinformati183nati/page/22/mode/2up> (дата обращения: 30.03.2023).
6. Казаков Д. В., Кутрышева Л. И. Фиксация и исследование диагностических параметров автомобилей, работающих на альтернативных видах топлива // *АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо*. 2016. № 3 (108). С. 14–16.
7. Пат. 2329510 Российская Федерация, МПК G 01 P 15/00. Устройство для измерения ускорения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания на всем диапазоне скоростей / Щегинин Н. В., Арженовский А. Г., Казаков Д. В. [и др.]. № 2007108605; заявл. 07.03.07; опубл. 20.07.08, Бюл. № 20.
8. Чепасов В. И. [и др.]. Алгоритмическая и программная реализация метода Гаусса в длинной арифметике с распараллеливанием прямого хода: моногр. Оренбург: Изд-во ГОУ ОГУ, 2008. 206 с. ISBN 978-5-7410-0796-9.
9. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченова Н. В. Вычислительные методы. 4-е изд. стер. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 672 с. ISBN 978-5-8114-1623-3.

10. Кондрашова Е. В., Скрышников А. В., Яковлев К. А. [и др.]. Сравнительная оценка надёжности грузовых автомобилей // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 123. С. 61–67. EDN WAPQJT.

11. Lebedev A. T., Arzhenovskiy A., Zhurba V. V. [et al.]. Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Vol. 1. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Rostov-on-Don, Feb. 24–26, 2021. Rostov-on-Don: Springer Verlag, 2022. P. 79–87. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_9. EDN VAMVQW.

12. Rondelli V., Martelli R., Casazza C. [et al.]. Methodological approach to assess tractor stability in normal operation in field using a commercial warning device // Journal of Agricultural Engineering. 2013. Vol. 44, no. e132. P. 659–662. DOI: 10.4081/jae.2013.374.

13. Lebedev A. T., Arzhenovskiy A. G., Chayka Ye. A. [et al.]. Methodology for assessing the efficiency of measures for the operational management of the technical systems' reliability // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Vol. 1. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Rostov-on-Don, Feb. 24–26, 2021. Rostov-on-Don: Springer Verlag, 2022. P. 13–20. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_2. EDN BTVEYT.

КАЗАКОВ Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» Армавирского

механико-технологического института (филиал) Кубанского государственного технологического университета (АМТИ КубГТУ), г. Армавир.

SPIN-код: 8907-4749;

ORCID: 0000-0002-9663-5750

AuthorID (SCOPUS): 57218553265

ResearcherID: 7202-2014

Адрес для переписки: kazakov_nti@inbox.ru

ГУРЖИ Наталия Леонидовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Машиностроение» АМТИ КубГТУ, г. Армавир.

SPIN-код: 5589-6827

ORCID: 0009-0001-9105-9854

Адрес для переписки: a_natali@bk.ru

КУРДАГИЯ Нугзар Эльдарович, студент гр. 21-ФАБ-НД1 кафедры «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» АМТИ КубГТУ, г. Армавир.

SPIN-код: 1432-2071

ORCID: 0009-0009-5718-2240

Для цитирования

Казаков Д. В., Гуржи Н. Л., Курдагия Н. Э. Разработка алгоритма и структуры программного обеспечения для диагностирования мобильных энергетических средств // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 30–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-30-38.

Статья поступила в редакцию 09.06.2023 г.

© Д. В. Казаков, Н. Л. Гуржи, Н. Э. Курдагия

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM AND STRUCTURE OF SOFTWARE FOR DIAGNOSTICS OF MOBILE POWER FACILITIES

The paper develops an algorithm for determining the required diagnostic parameters and performance indicators of mobile power equipment (MPE), which implements the methodology improved by the authors of the non-brake studies of the internal combustion engine (ICE) and moving MPE during the transient process of their acceleration. For the first time, the regularity of recording, processing data from primary converters and the sequence of calculating model parameters is shown, with the possibility of taking into account the characteristics of the transient processes of acceleration of the crankshaft of the internal combustion engine and the MPE. Thus, the developed algorithm and software structure are able to implement the methodology proposed by the authors of the non-standard studies of the internal combustion engine (ICE) and the moving MPE. To fix the required parameters from the primary converters, it is proposed to use the well-known programs CoolEdit2000 v.1.0.2374 and VisualGPS v.4.2.105.1. The article describes in detail each process of the algorithm, reflects the procedure for working with primary information and ways to improve the accuracy of calculations.

Keywords: diagnostics of transport, formless tests, traction dynamics, assessment of dynamism, engine power, automation of diagnostics.

References

1. Liu C., Lin H., Li Y. [et al.]. Analysis on Status and Development Trend of Intelligent Control Technology for Agricultural Equipment // Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2020. Vol. 51, no. 1. P. 1–18. DOI: 10.6041/J.ISSN.1000-1298.2020.01.001. (In Engl.).
2. Boltnev D. E., Denisenko V. V., Skrypnikov A. V. [et al.]. Eksperimental'nyye i teoreticheskiye zavisimosti proydenogo puti i raskhoda topliva ot skorosti dvizheniya avtomobilya na opytnykh uchastkakh, imeyushchikh razlichnyye uklony [Experimental and theoretical dependences of the distance traveled and fuel consumption on the vehicle speed along the test sites with different slopes] // Sistemy. Metody. Tekhnologii. The system. Methods. Technologies. 2021. No. 3 (51). P. 105–115. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-3-105-115. EDN UMUHNB. (In Russ.).
3. Kazakov D. V., Kuzmenko I. P., Moskvitin A. A. Development and testing of hardware-software complex for diagnostics of freight vehicles energy parameters // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2020. Vol. 873 (1). 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/873/1/012027. (In Engl.).
4. Volkova G. D., Novoselova O. V., Grigor'yev O. G. Issledovaniye metodologiy i metodov proyektirovaniya avtomatizirovannykh sistem razlichnogo naznacheniya [Research of methodologies and methods of design automated systems for various applications] // Elektronnyye informatsionnyye sistemy. Electronic Information Systems. 2014. Vol. 2 (2). P. 57–69. (In Russ.).
5. Integration definition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993, December 21. URL: <https://archive.org/details/federalinformati183nati/page/22/mode/2up> (accessed: 30.03.2023). (In Engl.).
6. Kazakov D. V., Kugrysheva L. I. Fiksatsiya i issledovaniye diagnosticheskikh parametrov avtomobiley, rabotayushchikh na al'ternativnykh vidakh topliva [Control method of technical condition of the mobile the powermeans working at alternative types of fuel] // AvtoGazoZapravochnyy kompleks + Al'ternativnoye toplivo. Autogas filling complex + alternative fuel. 2016. Vol. 3 (108). P. 14–16. (In Russ.).
7. Patent 2329510 Russian Federation, IPC G 01 P 15/00. Ustroystvo dlya izmereniya uskoreniya kolenchatogo vala dvigatelya vnutrennego sgoraniya na vsem diapazone skorostey [Device for measuring the acceleration of the crankshaft of an internal combustion engine over the entire speed range] / Shchetinin N. V., Arzhenovskiy A. G., Kazakov D. V. [et al.]. No. 2007108605. (In Russ.).
8. Chepasov V. I. [et al.]. Algoritmicheskaya i programmaya realizatsiya metoda Gaussa v dlinnoy arifmetike s rasparallelivaniyem pryamogo khoda [Algorithmic and software implementation of the Gauss method in long arithmetic with forward parallelization]. Orenburg, 2008. 206 p. ISBN 978-5-7410-0796-9. (In Russ.).
9. Amosov A. A., Dubinskiy Yu. A., Kopchenova N. V. Vychislitel'nyye metody [Computational methods]. 4th ed., ster. St. Petersburg, 2014. 672 p. ISBN 978-5-8114-1623-3. (In Russ.).

10. Kondrashova E. V., Skrypnikov A. V., Yakovlev K. A. [et al.]. Sravnitel'naya otsenka nadëzhnosti gruzovykh avtomobiley [Comparative assessment of truck reliability] // Trudy GOSNITI. Works of GOSNITI. 2016. Vol. 123 P. 61–67. (In Russ.).

11. Lebedev A. T., Arzhenovskiy A., Zhurba V. V. [et al.]. Operational Management of Reliability of Technical Systems in the Agro-Industrial Complex // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Vol. 1. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Rostov-on-Don, Feb. 24–26, 2021. Rostov-on-Don: Springer Verlag, 2022. P. 79–87. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_9. EDN VAMVQW. (In Engl.).

12. Rondelli V., Martelli R., Casazza C. [et al.]. Methodological approach to assess tractor stability in normal operation in field using a commercial warning device // Journal of Agricultural Engineering. 2013. Vol. 44, no. e132. P. 659–662. DOI: 10.4081/jae.2013.374. (In Engl.).

13. Lebedev A. T., Arzhenovskiy A. G., Chayka Ye. A. [et al.]. Methodology for assessing the efficiency of measures for the operational management of the technical systems' reliability // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Vol. 1. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Rostov-on-Don, Feb. 24–26, 2021. Rostov-on-Don: Springer Verlag, 2022. P. 13–20. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_2. EDN BTVEYT. (In Engl.).

KAZAKOV Dmitriy Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Machinery and Equipment of Oil and Gas Fields Department,

Armavir Institute of Mechanic and Technology (branch) of the Kuban State Technological University (AMTI KubSTU), Armavir.

SPIN-code: 8907-4749

AuthorID (SCOPUS): 57218553265

ORCID: 0000-0002-9663-5750

ResearcherID: 7202-2014

Correspondence address: kazakov_nti@inbox.ru

GURZHI Nataliya Leonidovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Mechanical Engineering Department, AMTI KubSTU, Armavir.

SPIN-code: 5589-6827

ORCID: 0009-0001-9105-9854

Correspondence address: a_natali@bk.ru

KURDAGIA Nugzar Eldarovich, Student gr. 21-FAB-ND1 of Machinery and Equipment of Oil and Gas Fields Department, AMTI KubSTU, Armavir.

SPIN-code: 1432-2071

ORCID: 0009-0009-5718-2240

Correspondence address: kurdagia.nugzar@yandex.ru

For citations

Kazakov D. V., Gurzhi N. L., Kurdagia N. E. Development of the algorithm and structure of software for diagnostics of mobile power facilities // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 30–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-30-38.

Received June 09, 2023.

© D. V. Kazakov, N. L. Gurzhi, N. E. Kurdagia

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

В статье рассмотрены вопросы повышения долговечности машин и механизмов на различных стадиях жизненного цикла изделия. Показаны составляющие, от которых зависит долговечность техники. Приведены требования к материалам анода, составу рабочей жидкости, результаты испытаний при реализации технологии репарации. Представлены результаты разработанной и запатентованной технологии повышения долговечности деталей трибосистем; получены новые составы рабочих жидкостей для реализации способа репарации и обработки деталей на этапе изготовления; разработаны, изготовлены и испытаны в условиях эксплуатации новые устройства, повышающие ресурс деталей на различных этапах жизненного цикла изделия, новые стенды для проведения испытаний разработанных технологий. Разработанные способы, устройства узлов машин и механизмов, позволяющие реализовать компенсацию износа при эксплуатации, обеспечивают значительное (в 1,5–3 раза) повышение ресурса.

Ключевые слова: надежность, долговечность, сохраняемость, коэффициент технической готовности, машины и механизмы, эффективность.

Ресурс машин напрямую связан с показателями эффективности использования. Расход горюче-смазочных материалов, стоимость технического обслуживания и ремонта, коэффициент технического использования зависят от свойств, заложенных в конструкцию при разработке и производстве изделия. Наличие отработанной документации на производство, эксплуатацию и ремонт изделия, совершенного оборудования для изготовления, обслуживания и ремонта, высококвалифицированного персонала — залог достижения поставленных целей при разработке высокотехнологичной продукции.

Организация производственного процесса, контроль качества комплектующих, выходной контроль сборочных единиц и изделия в целом позволяют выполнить поставленные в техническом задании цели.

Расходы на производство с каждым годом растут из-за повышения цен на энергоносители, стоимости материалов, транспортных расходов и других.

Низкая долговечность машин и изделий связана с износом узлов трения.

Ежегодно в мире расходуются сотни миллиардов долларов на восстановление узлов и механизмов из-за износа. Это приводит к снижению основных показателей эксплуатации машин. Ремонт требует значительно больших затрат, чем само их производство. До 95 % выхода из строя машин происходит из-за износа. Повышение долговечности только на 10 % может сократить расходы в десятки миллиардов рублей. Причиной досрочного выхода из строя могут быть недостатки при проектирова-

нии, изготовлении, неправильной эксплуатации. Приблизительно равные доли по значимости имеют эти факторы, они отличаются в зависимости от конкретных условий.

Замена на ряде производств ГОСТов СТП внутренними требованиями, устранение на каждом предприятии программ обеспечения надежности привели к снижению ресурса выпускаемых изделий. Так, пробег без капитального ремонта отечественных автомобилей в разы ниже, чем зарубежных.

В России имеется значительное количество выдающихся наработок фундаментальной науки в области повышения долговечности машин и механизмов. Но от разработки до внедрения в производство проходит много времени, финансирование НИОКР значительно отстает от ведущих стран в этой области.

Как указывалось, неоднократно в документах, производительность труда на отечественных предприятиях значительно ниже, чем на зарубежных. И причина в этом не лень или недостаток навыков наших специалистов (при переходе их на предприятия за рубежом они показывают отличные результаты), а отсутствие эффективной системы управления производством (управления проектами).

Отдельно остановимся на системе подготовки специалистов в области общего машиностроения. Такая важная дисциплина, как теория решения инженерных задач отсутствует в инженерных вузах, может, потому, что программу и тематический план подготовки специалистов педагоги готовят под свой уровень знаний.

В плане новых технологий повышения долговечности механизмов в статье рассмотрен способ регенерации трущихся деталей машин и механизмов, который предполагает восстановление массы изношенного слоя детали с использованием вещества и энергии от сторонних источников [1].

Основное влияние на эффективность процесса репарации оказывает материал анода, плотность тока в цепи анод-катод, концентрация и ингредиенты рабочей жидкости.

Рабочая жидкость должна обеспечивать низкий коэффициент трения и перенос ионов анода на катод, поэтому масла нефтяного происхождения не отвечают предъявляемым требованиям.

Анализ существующих масел для работы машин и механизмов, исследования и испытания позволили определить круг масел, позволяющих реализовать предлагаемую технологию [2, 3].

Рабочая среда должна обеспечивать смазку трущихся поверхностей, охлаждать детали машин и механизмов, удалять продукты трения, защищать от электрохимической коррозии [4]. Лучшими показателями обладают жидкости типа АМГ-10, МГЕ-10.

Эти смазки маловязкие с $v_{50} = 4...5$ мм²/с и $v_{-50} = 500$; всесезонные с $v_{50} = 10$ и $v_{-50} \leq 1500$; средневязкие с $v_{50} = 15$ и $v_{-50} \leq 4000$; вязкие с $v_{50} = 25...30$ мм²/с.

Смазка на основе полиэтиленгликоля ПГВ (ТУ 6-02-762-78) рекомендуется для использования в гидросистемах. Показатели этой жидкости: $\rho = 1,15$ г/см³; $v_{50} = 12...14$ мм²/с; $v_{20} = 44...51$ мм²/с; $v_0 = 160$ мм²/с; $v_{-53} = 4000$ мм²/с; $\vartheta_3 < -50$ °С; $pH = 8,2...8,85$; $p_i = 18$ кПа при 60 °С; $c = 2,5...2,6$ кДж/кг·°С при $\vartheta = 20$ °С, испаряемость 8,4 % при 60 °С; массовая доля воды 33,5–32,0 %. Состав ПГВ — смазочный материал, негорючий, при температуре 425 °С компоненты, входящие в состав жидкости, воспламеняются.

Кроме ПГВ, рекомендуется применять смазки П20, П20М1, М20М2 (ТУ 6-02-1140-78) со следующими характеристиками: $\rho = 1,145...1,155$ г/см³; $v_{50} = 60...90$ мм²/с; $v_3 = -10$ °С; $pH = 5,2...8,7$, температура самовоспламенения 420 °С; П20М1: $\rho = 1,125...1,140$ г/см³; $v_{50} = 18...25$ мм²/с; $v_{20} = 50...90$ мм²/с; $\vartheta_3 = -30$ °С; $pH = 8,1...8,6$; П20М2: $\rho = 1,145...1,155$ г/см³; $v_{50} = 20...27$ мм²/с; $v_{20} = 65...100$ мм²/с; $\vartheta_3 = -45$ °С. Эти жидкости различаются наличием различных присадок и их концентраций.

Лучшие результаты при исследованиях показала рабочая смазочная жидкость на основе полиэтиленгликоля с характеристиками ($M = 4000$ г/моль), воскообразным веществом ($M = 4000...6000$ г/моль) и твердым веществом ($M > 6000$ г/моль).

Разновидностью этой жидкости является ПЭГ–35 $M = 1500$ г/моль и ПЭГ–115 $M = 5000$ г/моль.

Важным показателем используемых водно-глицириновых составов является их электрическое сопротивление, которое определяется по формуле:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}, [\text{Ом} \cdot \text{м}],$$

где ρ — удельное сопротивление базовой жидкости; R — сопротивление объема базовой жидкости в ячейке;

S — площадь поверхности платинового электрода;

L — расстояние между электродами.

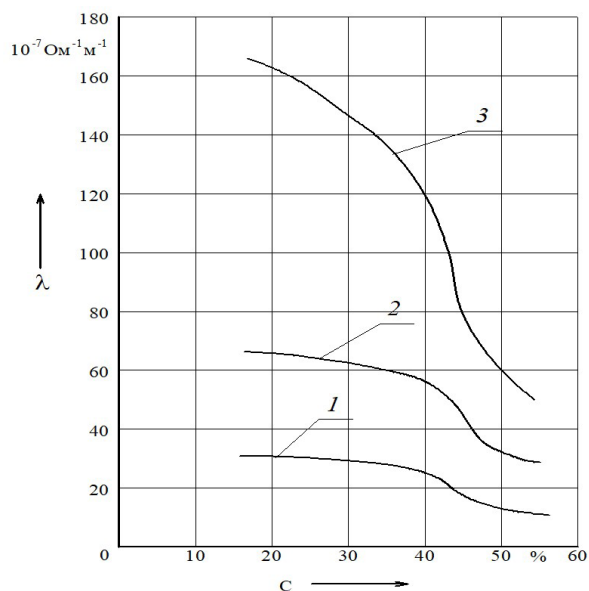


Рис. 1. Графическое представление свойств рабочей жидкости от температуры: 1 — 20 °С; 2 — 50 °С; 3 — 80 °С

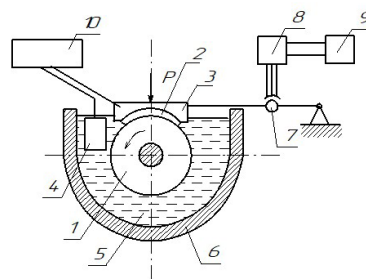


Рис. 2. Схема лабораторной установки для испытания различных рабочих жидкостей: 1 — образец для испытаний; 2 — контртело; 3 — держатель контртела; 4 — вставка — анод; 5 — смазочная рабочая жидкость; 6 — ячейка; 7 — тензометрическое кольцо; 8 — тензоусилитель; 9 — осциллограф; 10 — источник тока

Показатель удельной проводимости определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\rho}, [\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}],$$

Результаты исследований представлены на рис. 1. Для определения требуемого результата функционирования системы (весовой износ за единицу времени) потребовалось исследовать влияние различных сочетаний влияющих параметров:

$$y = f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Экспериментальные испытания проводились на типовых парах трения, предназначенных для машины СМТ-1 (рис. 2).

Область экспериментирования ограничена тремя определяющими факторами:

$$j - (x) - 17,7...45,5 \text{ Ам}^{-2};$$

$$C - (y) - 35...55 \%;$$

$$\varphi^0 - (z) - 0,126...0,763 \text{ В}.$$

Основным показателем эффективности трибо-системы принят весовой износ:

$$J = J_1 + \frac{l}{2\pi R} \cdot J_2,$$

где J_1 — интенсивность изнашивания «колодки»;
 J_2 — интенсивность изнашивания «вала»;
 l — наибольший путь трения точек «вала» (длина сектора «колодки» при контакте);
 R — радиус сочленения «колодки» с «валом».
 При этом интенсивность изнашивания «колодки» определялась по формуле:

$$J_1 = \frac{\Delta q_1}{2\pi R n F \gamma_1},$$

где Δq_1 — потеря массы «колодки» за время испытания;

R — радиус сочленения «колодки» с «валом»;

n — количество оборотов (циклов) за время испытания;

$F = l \cdot b_1$ — площадь контакта «колодки» с «валом»;

l — длина сектора «колодки» при контакте (определялась по методике расчета подшипника скольжения на износ i ;

b_1 — ширина «колодки»;

а интенсивность изнашивания «вала» определялась по формуле:

$$J_2 = \frac{\Delta q_2}{2\pi R n b_2 \gamma_2},$$

где Δq_2 — потеря массы «вала» за время испытания;

R — радиус «вала» (радиус сочленения);

b_2 — ширина «вала»;

l — наибольший путь трения точек поверхности «вала» (длина сектора «колодки» при контакте);

γ_2 — плотность материала «вала».

Итогом экспериментальных исследований является зависимость изнашивания от величины электрического тока (рис. 3), концентрации загустителя (рис. 4), электродного потенциала материала анода (рис. 5).

При функционировании любой машины и механизма с применением репарации присутствует два процесса: износ и компенсация износа. Износ определяется формулой:

$$u = Vt; u = VL,$$

где V — скорость износа, t — время, L — путь трения.

Условие стабильного состояния системы:

$$m_{\text{осаждения}} - m_{\text{изнашивания}} = k,$$

причем, если $k > 0$, идет восстановление; $k < 0$ — износ; $k = 0$ — стабилизация состояния.

Интенсивность восстановления изнашиваемых деталей машин зависит от величины электрического тока, электрохимического потенциала анода и свойств рабочей жидкости, применяемой в системе:

$$dm_2 / dt = \eta \epsilon \chi u / \rho,$$

где η — выход по току;

ϵ — электрохимический эквивалент материала анода;

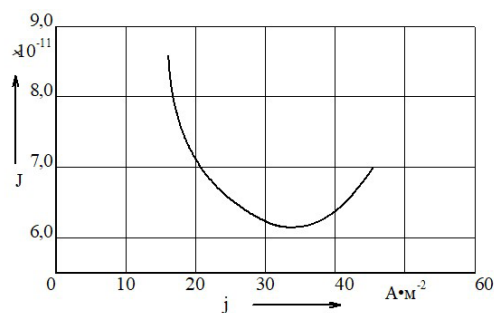


Рис. 3. Интенсивность износа от величины тока в цепи анод-катод (пара трения — сталь 45-БрОСЦ-5-5; $N = 1600$ Н; $V = 2,1$ м·с⁻¹)

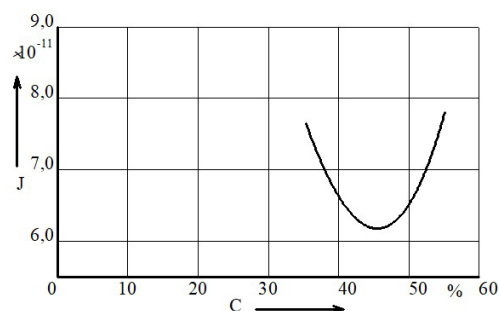


Рис. 4. Показатели эффективности функционирования трибосистемы для различных пар трения (пара трения — сталь 45-БрОСЦ-5-5; $N = 1600$ Н; $V = 2,1$ м·с⁻¹)

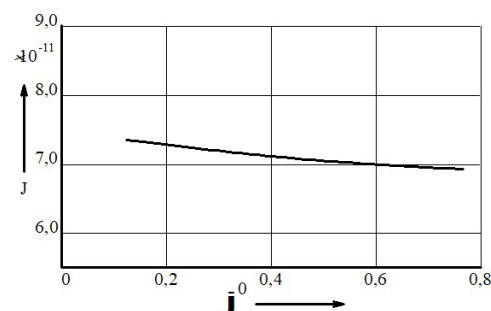


Рис. 5. Износостойкость материала в зависимости от материала анода (пара трения — сталь 45-БрОСЦ-5-5; $N = 1600$ Н; $V = 2,1$ м·с⁻¹)

χ — удельная проводимость рабочей жидкости;

u — напряжение на электродах;

p — межэлектродный зазор.

Показатели движения рабочей жидкости — ламинарное перемещение:

$$dm_1 / dt = \rho D \frac{d_c}{d_y},$$

где ρ — плотность рабочей жидкости (2500...3000 кг/м³);

D — коэффициент диффузии, изменяется в зависимости от концентрации электролита и его температуры;

c — массовая концентрация продуктов обработки;

y — длина по направлению, перпендикулярному обрабатываемой поверхности.

Для установившегося режима диффузии:

$$d_c/d_y \approx (c_a - c_{вх})/\delta,$$

где c_a — концентрация ионов металла в рабочей жидкости ($c_a = 0,92...0,97$);

$c_{вх}$ — массовая доля продуктов обработки в рабочей жидкости на входе в рабочую зону;

δ — толщина диффузионного слоя.

Глубина проникновения ионов металла в поверхностный слой обрабатываемых деталей имеет зависимость:

$$\delta = R\sqrt{v l_p / v_s^1} / \sqrt[3]{v/D},$$

где $R = 4,64$ — безразмерный коэффициент;

v — кинематическая вязкость жидкости в пределах диффузионного слоя: $v = 1,2...1,8$ мм²/с;

l_p — длина участка детали, на котором происходит осаждение металла в течение электролита, мм;

v_s^1 — средняя по потоку скорость течения жидкости, мм/с;

D — коэффициент диффузии.

Получим формулу для расчета v_s^1 :

$$v_s^1 < \frac{R^2 v l_p \eta^2 \epsilon^2 \chi^2 u^2}{\rho^2 D^2 (c_a - c_{вх})^2 \rho^2 (v/D)^{2/3}}.$$

Процесс протекает при растворении материала анода, транспортировании его при помощи циркуляционной рабочей жидкости к трущимся деталям и осаждения на их поверхности ионов металла за счет разности электродных потенциалов анода и катода [5–8].

Процесс трибоэлектрохимической компенсации износа требует незначительных мощностей (в пределах 40...100 Вт) и позволяет в несколько раз увеличить ресурс машины или механизма.

В ходе исследования разработаны и запатентованы: новая технология повышения долговечности деталей трибосистем, получены новые составы рабочих жидкостей для реализации способа репарации и обработки деталей на этапе изготовления; разработаны, изготовлены и испытаны в условиях эксплуатации новые устройства, повышающие ресурс деталей на различных этапах жизненного цикла изделия, новые стенды для проведения испытаний разработанных технологий [9–11].

Разработанные способы, устройства узлов машин и механизмов, позволяющие реализовать компенсацию износа при эксплуатации, обеспечивают значительное (в 1,5–3 раза) повышение ресурса.

Библиографический список

1. Шаргаев А. А., Макаренко Н. Г., Мамей С. А. [и др.]. Методика повышения долговечности опор качения двигателя внутреннего сгорания электрохимикомеханической обработкой // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 36–40.
2. Рыжкин А. А., Шучев К. Г., Фоминов Е. В. Труды Южного научного центра Российской академии наук. Т. 2. Физика. Механика. Техника / под ред. академика Г. Г. Матишова. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. 344 с. ISBN 978-5-902982-19-7.
3. Чулкин С. Г., Алексеев С. П., Бреки А. Д. [и др.]. Снижение износа и энергетических потерь на трение в оборудовании механической обработки посредством применения консистентных смазочных материалов: моногр. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 194 с. ISBN 978-5-7679-4394-4.
4. Бреки А. Д., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г. Использование обобщенного треугольника Паскаля для описания коле-

баний силы трения материалов // Материаловедение. 2016. № 11. С. 3–8. EDN WZRDIJ.

5. Бреки А. Д., Чулкин С. Г., Гвоздев А. Е. [и др.]. Обобщенная математическая модель внешнего трения скольжения твердых тел // Материаловедение. 2021. № 10. С. 44–48. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-10-44-48. EDN HXVMDA.

6. Бреки А. Д., Чулкин С. Г., Гвоздев А. Е. [и др.]. Закономерности трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в среде смазочного материала Литол-24 с дисперсными частицами // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 10. С. 28–34. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-28-34. EDN XGVNTU.

7. Яхимович В. А., Бреки А. Д., Альхименко А. А. [и др.]. Методика исследования износа резьбы буровых труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24, № 3. С. 8–20. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-3-8-20.

8. Программа для ЭВМ № 2018664179 RU. Программный комплекс для расчета напряженного и деформированного состояния металлических, порошковых, аморфных, неметаллических, наноструктурных композиционных систем и материалов конструкционного, инструментального и триботехнического назначения в различных условиях / Гвоздев А. Е., Журавлев Г. М., Минаев И. В. [и др.]. № 2018660758; заявл. 05.10.18; опубл. 12.11.18. Бюл. № 11.

9. Пат. 2694683 Российская Федерация, МПК F 02 D 17/04. Электролит для электрохимикомеханического упрочнения сталей. Устройство защиты двигателя танка от аварийных ситуаций / Макаренко Н. Г., Шаргаев А. А., Винник А. И. [и др.]. № 2017102818; заявл. 27.01.17; опубл. 16. 07.19. Бюл. № 20.

10. Пат. 181414 Российская Федерация, МПК F 16 C 41/02. Устройство для приработки и повышения долговечности подшипника качения / Макаренко Н. Г., Шаргаев А. А. [и др.]. № 2017127866; заявл. 03.08.17; опубл. 13.07.218. Бюл. № 20.

11. Пат. 2554236 Российская Федерация, МПК B 24 C 7/00. Способ безразборного восстановления трущихся сопряжений двигателя дизель-генераторной установки локомотива / Макаренко Н. Г., Войчак С. А., № 2013141964; заявл. 13.09.13; опубл. 27.05.15. Бюл. № 24.

МАКАРЕНКО Николай Григорьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела (экспериментальных исследований и испытаний) Военного инновационного технополиса «ЭРА», г. Анапа. Адрес для переписки: era_1@mil.ru

ЯКОВЛЕВА Юлия Сергеевна, научный сотрудник научно-исследовательского отдела (экспериментальных исследований и испытаний) Военного инновационного технополиса «ЭРА», г. Анапа. SPIN-код: 3474-0490 AuthorID (РИНЦ): 657954

Адрес для переписки: era_1@mil.ru
МИХАЛЕВИЧ Олег Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела (экспериментальных исследований и испытаний) Военного инновационного технополиса «ЭРА», г. Анапа. Адрес для переписки: era_1@mil.ru

Для цитирования

Макаренко Н. Г., Яковлева Ю. С., Михалевич О. А. Способы повышения долговечности машин и механизмов // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 39–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-39-44.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023 г.
© Н. Г. Макаренко, Ю. С. Яковлева, О. А. Михалевич

WAYS TO INCREASE THE DURABILITY OF MACHINES AND MECHANISMS

The article deals with the issues of increasing the durability of machines and mechanisms at various stages of the product life cycle. The components on which the durability of equipment. The requirements for the anode materials, the composition of the working fluid, the test results for the implementation of the reparation technology are given. The results of the developed and patented technology for increasing the durability of tribosystem parts are presented, new compositions of working fluids are obtained to implement the method of repair and processing of parts at the manufacturing stage, new devices are developed, manufactured and tested under operating conditions that increase the life of parts at various stages of the product life cycle, new stands for testing of developed technologies. The developed methods, arrangements of machine and mechanism units, which allow to implement wear compensation during operation, provide a significant (1,5–3 times) increase in the resource.

Keywords: reliability, durability, storability, coefficient of technical readiness, machines and mechanisms, efficiency.

References

1. Shargayev A. A., Makarenko N. G., Mamey S. A. [i dr.]. Metodika povysheniya dolgovechnosti opor kacheniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya elektrokhimikomekhanicheskoy obrabotkoy [Durability improvement of rolling-contact bearings in internal combustion engine by electrochemical and mechanical processing] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017. no. 6 (156). P. 36–40. (In Russ.).

2. Ryzhkin A. A., Shuchev K. G., Fominov E. V. Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. T. 2. Fizika. Mekhanika. Tekhnika [Studies of the Southern scientific center of the Russian academy of science. Vol. 2. Physics. Mechanics. Technic] / ed. by G. G. Matishov. Rostov-on-Don, 2007. 344 p. ISBN 978-5-902982-19-7. (In Russ.).

3. Chulkin S. G., Alekseev S. P., Breki A. D., Gvozdev A. E. Snizheniye iznosa i energeticheskikh poter' na treniye v oborudovanii mekhanicheskoy obrabotki posredstvom primeniya konsistentnykh smazochnykh materialov [Reduction of wear and friction energy losses in mechanical processing equipment through the use of greases]. Tula, 2019. 194 p. ISBN 978-5-7679-4394-4. (In Russ.).

4. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. Ispol'zovaniye obobshchennogo treugol'nika Paskalya dlya opisaniya kolebaniy sily treniya materialov [Use of generalized Pascal pyramid for fluctuation description of friction force of materials] // Materialovedeniye. *Materials Science*. 2016. No. 11. P. 3–8. EDN WZRDIJ. (In Russ.).

5. Breki A. D., Chulkin S. G., Gvozdev A. E. [et al.]. Obobshchennaya matematicheskaya model' vneshnego treniya skol'zheniya tverdykh tel [Generalized mathematical model of external sliding friction of solids] // Materialovedeniye. *Materials Science*. 2021. No. 10. P. 44–48. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-10-44-48. EDN HXVMDA. (In Russ.).

6. Breki A. D., Chulkin S. G., Gvozdev A. E. [et al.]. Zakonomernosti treniya skol'zheniya stali R6M5 po stali 45 v

smrede smazochnogo materiala Litol-24 s dispersnymi chastitsami [Regularities of sliding friction of steel r6m5 on steel 45 in environment of Litol-24 lubricant with dispersed graphite particles] // Deformatsiya i razrusheniye. *Deformation and Fracture of Materials*. 2021. No. 10. P. 28–34. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-28-34. EDN XGVNTU. (In Russ.).

7. Yakhimovich V. A., Breki A. D., Alkhimenko A. A. [et al.]. Metodika issledovaniya iznosa rez'by buril'nykh trub pri mnogokratnom svinchivanii i vyderzhke pod nagruzkoy [Methodology for studying the wear of drill pipe threads during repeated making up and holding under load] // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. *Proceedings of Southwest State University*. 2020. Vol. 24, no. 3. P. 8–20. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-3-8-20. (In Russ.).

8. Computer Program 2018664179 Russian Federation. Programmnyy kompleks dlya rascheta napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya metallicheskih, poroshkovykh, amorfnykh, nemetallicheskih, nanostrukturnykh kompozitsionnykh sistem i materialov konstruksionnogo, instrumental'nogo i tribotekhnicheskogo naznacheniya v razlichnykh usloviyakh [Software package for calculating the stressed and deformed state of metallic, powdered, amorphous, non-metallic, nanostructured composite systems and materials for structural, instrumental and tribotechnical purposes in various conditions] / Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M., Minayev I. V. [et al.]. No. 2018660758. (In Russ.).

9. Patent 2694683 Russian Federation, IPC F 02 D 17/04. Elektrolit dlya elektrokhimikomekhanicheskogo uprochneniya staley [Electrolyte for electrochemical mechanical hardening of steel] / Makarenko N. G., Shargayev A. A., Vinnik A. I. [et al.]. No. 2017102818. (In Russ.).

10. Patent 181414 Russian Federation, IPC F 16 C 41/02. Ustroystvo dlya prirabotki i povysheniya dolgovechnosti podshpivnika kacheniya [A device for running-in and increasing the durability of a rolling bearing] / Makarenko N. G., Shargayev A. A. [et al.]. No. 2017127866. (In Russ.).

11. Patent 2554236 Russian Federation, IPC B 24 C 7/00. Sposob bezrazbornogo vosstanovleniya trushchikhsya sopryazheniy dvigatelya dizel'-generatornoy ustanovki lokomotiva [A method of non-disassembly restoration of rubbing interfaces of the engine of a diesel generator set of a locomotive] / Makarenko N. G., Voychak S. A. No. 2013141964. (In Russ.).

MAKARENKO Nikolay Grigoryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Research (Experimental Research and Testing) Department, Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa.

Correspondence address: era_1@mil.ru

YAKOVLEVA Yuliya Sergeevna, Researcher of Research (Experimental Research and Testing) Department, Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa.

SPIN-code: 3474-0490

AuthorID (RSCI): 657954

Correspondence address: era_1@mil.ru

MIKHALEVICH Oleg Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Research (Experimental Research and Testing) Department, Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa.

Correspondence address: era_1@mil.ru

For citations

Makarenko N. G., Yakovleva Yu. S., Mikhalevich O. A. Ways to increase the durability of machines and mechanisms // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 39–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-39-44.

Received February 20, 2023.

© N. G. Makarenko, Yu. S. Yakovleva, O. A. Mikhalevich

АНАЛИЗ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

Микрофрезерование является широко используемым производственным методом обработки. Основной целью данного исследования является анализ сил резания в коррозионно-стойкой, жаропрочной стали 14X17H2. Исследования полного факторного эксперимента по обработке стали 14X17H2 проводились с использованием микроконцевой фрезы с покрытием AlTiN. Были разработаны новые математические модели силы резания и осевой силы, которые адекватно способны прогнозировать и оптимизировать силы, действующие на режущий инструмент. Получены графики расчета минимально необходимой подачи на зуб и глубины резания, при которых обеспечиваются максимальные силы резания и осевые силы, что позволяет повысить стойкость режущего инструмента при микрофильмировании. Полученные математические модели описывают с 90 %-ной и более точностью полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: производство, фреза, силы резания, подача на зуб, стратегия фрезерования, встречное фрезерование, попутное фрезерование, канавочное фрезерование.

Введение. Важность процессов микрообработки сильно возрастает, поскольку промышленность требует еще большего количества точных миниатюрных компонентов деталей. Микрофрезерование является очень многообещающей технологией, поскольку оно способно производить даже сложные 3D-геометрии с высокой точностью и относительно высокой скоростью съема материала [1]. Хотя кинематика процесса микрофрезерования аналогична кинематике обычного фрезерования, он обладает большим количеством проблем из-за уменьшенного размера режущего инструмента. Характерный диапазон размеров на детали составляет от 1 до 999 мкм; поэтому размер применяемых микроинструментов обычно находится в этом же диапазоне [2].

1. Постановка задачи. При микрофрезеровании основными проблемами являются относительно большое биение и деформация инструмента [3]. При этом необходимо учитывать величину подачи на зуб и глубину резания, сравнимые с радиусом фрезы, так как они оказывают существенное влияние на силы резания и стойкость режущего инструмента [4].

2. Теория. На основании последних научных работ отношение минимальной толщины стружки к радиусу округления режущей кромки составляет от 0,22 до 0,36 [5]. Влияние сил резания имеет большое значение при микрофрезеровании, так как малогабаритный и легкий инструмент более чувствителен к силам, чем при обычном фрезеровании. Относительно высокие силы резания могут привести к значительной деформации фрезы [6]. Как известно, силы зависят от параметров резания, причем в случае микро размеров существенное влияние на эффективные углы резания оказывают

геометрия инструмента и применяемые параметры резания [7].

В работе [8] представлена аналитическая модель силы резания и модель для оценки деформации инструмента. В аналитической модели рекомендовали учитывать биение инструмента, радиус режущей кромки, скорость резания, угол наклона винтовой спирали и передний угол фрезы. Эта модель учитывает эффект износа инструмента, который основан на ранее представленной трехмерной динамической аналитической модели оценки силы резания [9], которая также учитывает размерный эффект, упругое пружинение материала и износ инструмента. Как известно, возникновение неконтролируемой силы резания может привести к ухудшению качества поверхности, а также к выходу инструмента из строя из-за нестабильных режимов резания [10]. Учитывая особые характеристики процесса микрофрезерования, такие как относительно большое биение и деформация небольшого инструмента (диаметр < 1 мм), очень сложно смоделировать динамическое поведение процесса [11]. Наиболее распространенной формой автоколебаний является регенеративная вибрация, вызывающая нестабильность в процессе резания [12]. Это одно из основных препятствий для повышения производительности и качества изготавливаемых микрофрезерованием деталей [13].

В работе [14] проанализировали возникновение осевой силы и силы резания, основываясь на характерном узоре, оставленном на поверхности микрофрезой, и на основе частотноспектрального анализа сил резания. Подобные наблюдения анализа сил резания имеет большое значение при изучении механики и динамики процесса микрофрезерования, поскольку имеет тесную взаимосвязь с вибрациями

Факторы и уровни эксперимента

Фактор	Уровень	Значение
Глубина резания t (μm)	3	25, 50, 100
Подача на зуб f_z (μm)	7	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12
Стратегия фрезерования	3	Встречное фрезерование, Попутное фрезерование, Канавочное фрезерование

Таблица 2

Матрица эксперимента и полученные результаты испытаний

	Изменяемое значение		Силы при встречном фрезеровании		Силы при канавочном фрезеровании		Силы при попутном фрезеровании	
	f_z (мм)	t (мм)	F_c , Н	F_z , Н	F_c , Н	F_z , Н	F_c , Н	F_z , Н
1	1	25	0,6	1,7	0,4	1,3	0,5	1,7
2	2	25	1,1	2,3	0,7	1,5	0,8	1,9
3	4	25	2	1,8	1,4	1,8	1,4	2
4	7	25	2,3	2	2,1	2,8	2	2,3
5	9	50	1,4	1,9	2,2	1,6	2,4	3
6	10	50	1,6	2	3,0	1,9	2,6	3
7	11	50	1,7	2,3	2,4	2,2	2,9	3,6
8	12	50	1,9	2,6	2,8	2,8	3,3	3,6
9	2	50	0,6	0,4	1,3	0,7	1,2	2,7
10	3	100	3,7	3,1	5,0	1,4	3,4	3
11	5	100	3,9	3,2	5,3	1,9	3,8	3,2
12	6	100	4,6	3,4	5,8	2	4,4	3,6
13	8	100	5,2	3,5	6,1	2,8	5,4	3,7
14	9	100	5,6	3,7	6,9	2,9	5,8	3,8

[15]. На основании ранее полученных исследований [16] регенеративные эффекты сильнее в случае обработки микроразмеров, чем в случае при обработке макроразмеров. Причину этого явления можно найти и во влиянии на стружкообразование небольшой теоретической толщины стружки, и во влиянии относительно большого радиуса режущей кромки.

В последнее время в секторе научных разработок, посвященных микрофрезерованию, недостаточно работ, посвященных выбору режима резания для обработки различных материалов. Основываясь на упомянутых выше пробелах в исследованиях, основной целью данной статьи является исследование влияния параметров резания на силу резания и осевую силу в коррозионностойкой закаленной стали. Еще одна цель состоит в том, чтобы проанализировать влияние стратегий фрезерования на характеристики выходных параметров получаемых при обработке.

3. Проведение эксперимента и его результаты. Для анализа сил резания использовался станок с ЧПУ Mazak серии VARIAXIS j-500. Этот ЧПУ применялся для двух различных стратегий обработки — линейного и трохoidalного фрезерования. Станок серии VARIAXIS j-500 представляет собой вертикальный обрабатывающий центр с функцией отображения сил резания, оказывающих влияние на шпиндель.

Образец для испытаний имеет прямоугольную форму размером 50×120×50 мм из легированной,

коррозионностойкой, жаропрочной стали 14X17H2. Сталь 14X17H2 содержит углерода 0,14 %, X17 — указывает на 17 % содержания хрома, H2 — указывает на 2 % содержания в стали никеля.

Нержавеющая сталь 14X17H2 применяется для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах и при пониженных температурах. Наибольшей коррозионностойкостью обладает после закалки с высоким отпуском. Из нержавеющей стали 14X17H2 изготавливают диски, валы, втулки, фланцы, крепеж и другие детали для топливно-регулирующей аппаратуры авиационного назначения.

Обработка велась двузубыми фрезами диаметром 500 мкм с покрытием AlTiN и радиусом при вершине 50 мкм с передним углом фрезы 3°, задний угол фрезы 7° и угол наклона винтовой канавки фрезы 15°.

Эксперименты были спланированы методом полного факторного эксперимента с изменениями глубины резания, подачи на зуб и стратегии фрезерования. Факторы и их уровни были выбраны на основе экспериментальной работы [16] и предложений производителя инструмента. Скорость резания была установлена на 90 м/мин, а радиальная глубина резания была установлена на 50 % от диаметра режущего инструмента (в случае встречного и попутного фрезерования). Независимые переменные и их уровни перечислены в табл. 1.

Одной из важнейших характеристик процессов резания является сила резания [17], так как она

Полученные значения математических моделей

Значение для зависимости	Уравнение 1	Уравнение 4	Уравнение 2	Уравнение 5	Уравнение 3	Уравнение 6
Множество R	0,983421	0,95268	0,991528	0,958547	0,984669	0,977358
Множество R2	0,96711	0,90761	0,98312	0,918814	0,969573	0,955230
F(3,10)	98,03620	32,74871	194,24038	37,72471	106,21963	71,12147
p	0,00000010264	0,0000175	0,00000000368	0,00000922	0,0000000697	0,00000047771

дает актуальную информацию о механизме съема материала, вибрации, деформации инструмента и его биении. В рамках этого исследования были проанализированы равнодействующая сила резания (F_c) и осевая сила (F_z). F_c была рассчитана на основе следующего уравнения:

$$F_c = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} \quad (1)$$

Таблица плана эксперимента и полученные результаты испытаний представлены в табл. 2. Определение зависимости $F_c = f(t, fz)$ и $F_z = f(t, fz)$ выполнялось в программе для статистического анализа и визуализации данных Statistica.

Сила резания F_c в основном увеличивается с увеличением глубины резания t при встречном, канавочном и попутном фрезеровании. Силы F_c при встречном фрезеровании выше, чем при канавочном фрезеровании. Однако это явление имеет ограниченное увеличение до подачи на зуб при половине диаметра ($fz > 6$ мкм) или равна радиусу при вершине инструмента. Возможная причина в явлениях утончения стружки, вызванных меньшим главным углом режущей кромки из-за углового радиуса и малых значений глубины резания. В этом случае условия резания приводят к более высоким осевым усилиям, что хорошо видно в таблице полученных экспериментальных значений F_z (табл. 3). При всех стратегиях фрезерования осевая сила F_z увеличивается с увеличением fz . Самые большие силы F_z и F_c наблюдались при фрезеровании канавок с $t = 100$ мкм и $fz = 9$ мкм, что можно объяснить удвоенным сечением стружки по сравнению со стратегиями фрезерования по кромке заготовки.

Максимальные полученные значения F_c при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 23 %. Максимальные полученные значения F_z при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 3 %.

Минимальные полученные значения F_c при всех трех стратегиях фрезерования отличаются не более чем на 30 %. Минимальные полученные значения F_z при всех трех стратегиях фрезерования отличаются не более чем на 3 %.

4. Разработка математических моделей зависимости силы резания и осевой силы резания от подачи на зуб и глубины резания для встречного, канавочного и попутного фрезерования. Определение зависимости $F_c = f(t, fz)$ и $F_z = f(t, fz)$ для трех стратегий фрезерования выполнялось в программе для статистического анализа и визуализации данных Statistica. Полученные характеристики математических значений представлены в табл. 3 и табл. 4. Коэффициент детерминации у всех полученных моделей выше 0,95, т.е. 95 % и более колебаний изучаемых значений F_c и F_z описывается данными

Таблица 4

Полученные значения коэффициентов регрессии и их уровень значимости в полученных математических моделях

Св. член	Уравнение 1		Уравнение 2		Уравнение 3		Уравнение 4		Уравнение 5		Уравнение 6	
	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.	B	p-знач.
fz (mm)	3,900313	0,000070	3,569106	0,015300	3,315072	0,000005	1,279393	0,044774	0,663133	0,049851	0,097280	0,000170
t (mm)	0,201126	0,000142	0,148780	0,000053	0,214259	0,000001	-0,058968	0,038166	0,255816	0,000010	0,044495	0,007016
ap ²	-0,163736	0,000108	-0,110420	0,013349	-0,109987	0,000056	0,000759	0,002221	-0,000226	0,000043	0,000226	0,046294

ми моделями. Значение F-критерий Фишера выше табличного у всех разработанных математических моделей, поэтому все модели статистически значимы и объясняют общую дисперсию полученных данных при эксперименте (табл. 2). Коэффициенты регрессии глубины резания (t), глубины резания (t), возведенной во вторую степень, и подачи на зуб (fz) являются статистически значимыми у моделей, описывающих изменение сил резания (F_c) и осевых сил (F_z) от глубины резания (t) и подачи на зуб (fz) (табл. 3). Уровень значимости (p) у всех уравнений меньше 0,05, поэтому данные модели пригодны для использования (табл. 4).

Сила резания (F_c) может быть рассчитана на основе уравнения (1) для встречного фрезерования, уравнения (2) для канавочного фрезерования и уравнения (3) для стратегии попутного фрезерования. Соответствующие R2 значения составляют 96,71 %, 98,31 % и 96,95 % соответственно.

$$F_c = 0,001583ap^2 - 0,163736t + 0,201126fz + 3,900313; \quad (1)$$

$$F_c = 0,001023ap^2 - 0,073017t + 0,207810fz + 1,605086, \quad (2)$$

$$F_c = -0,000226ap^2 + 0,044495t - 0,097280fz + 0,663133. \quad (3)$$

Сила резания (F_z) может быть рассчитана на основе уравнения (4) для встречного фрезерования, уравнения (5) для канавочного фрезерования и уравнения (6) для стратегии попутного фрезерования. Соответствующие R2 значения составляют 90,76 %, 91,88 % и 95,52 % соответственно.

$$F_z = 0,000993ap^2 - 0,110420t + 0,148780fz + 3,569106, \quad (4)$$

$$F_z = 0,000856ap^2 - 0,109987t + 0,214259fz + 3,315072, \quad (5)$$

$$F_z = 0,000856ap^2 - 0,109987t + 0,214259fz + 3,315072. \quad (6)$$

Методом наименьших квадратов получены графические представления полученных математических уравнений 1-6. Полученные графики позволя-

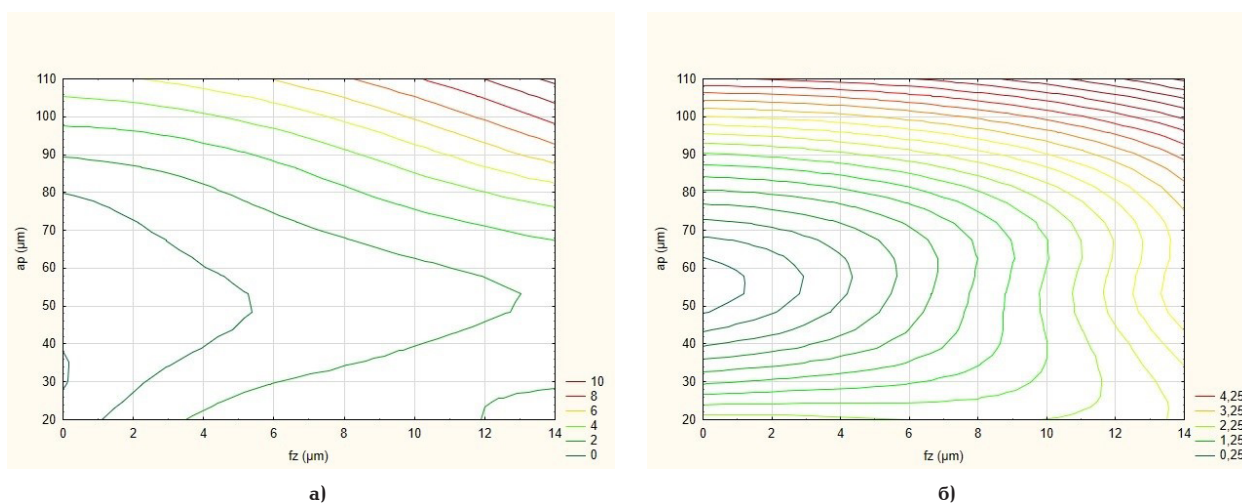


Рис. 1. Графики зависимости силы резания (а) и осевой силы (б) от подачи на зуб и глубины резания при встречном фрезеровании

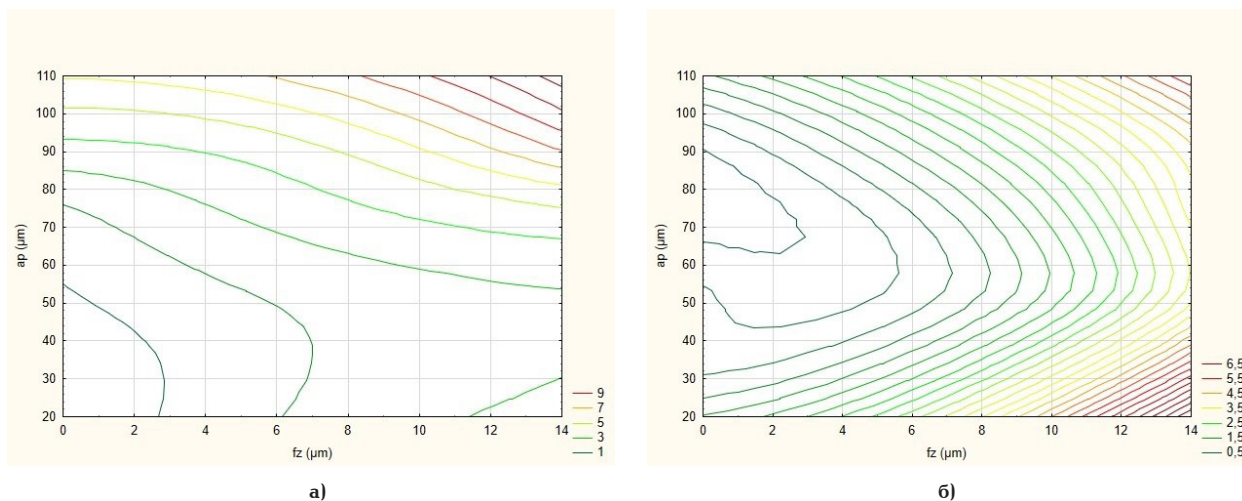


Рис. 2. Графики зависимости силы резания (а) и осевой силы (б) от подачи на зуб и глубины резания при канавочном фрезеровании

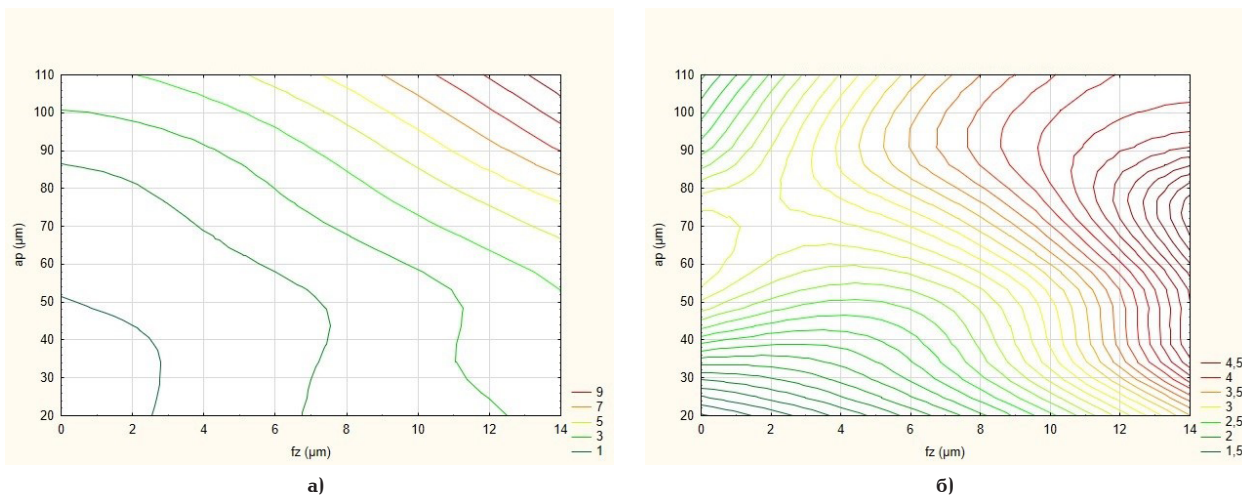


Рис. 3 Графики зависимости силы резания (а) и осевой силы (б) от подачи на зуб и глубины резания при попутном фрезеровании

ют подобрать подачу на зуб и глубину резания для ограничения действующей силы резания и осевой силы, действующей на режущий инструмент для встречного (рис. 1), канавочного (рис. 2) и попутного фрезерования (рис. 3).

Выводы. В рамках данного исследования были разработаны и проведены эксперименты по микрофрезерованию коррозионностойкой закаленной нержавеющей стали 14X17N2 с целью анализа влияния подачи на зуб, глубины резания и стратегий фрезерования на силы резания. Для экспериментов использовался имеющийся в свободной продаже микрофрезерный инструмент с покрытием и двумя канавками.

Экспериментальные результаты показывают, что составляющие силы резания увеличиваются с увеличением анализируемых параметров процесса. Максимальные полученные значения F_c при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 23%. Максимальные полученные значения F_z при встречном фрезеровании и попутном фрезеровании отличаются не более чем на 3 %. Разработанная экспериментальная модель силы резания адекватно предсказывает значения силы резания ($R^2 > 98,93$ %).

Получены математические модели и графики зависимостей для расчета минимально необходимой подачи на зуб и глубины резания, при которых обеспечиваются максимальные силы резания и осевые силы, что позволяет повысить стойкость режущего инструмента. Полученные математические модели описывают с 90-процентной и более точностью полученные экспериментальные данные.

Библиографический список

- Xu G., Chen J., Zhou H. [et al.]. Multi-objective feedrate optimization method of end milling using the internal data of the CNC system // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 715–731. DOI: 10.1007/s00170-018-2923-8.
- Волков Д. И., Проскуряков С. А. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011. Т. 15, № 3 (43). С. 72–78.
- Расщупкин А. В., Макашин Д. С. Повышение точности формообразования поверхности твердосплавным осевым инструментом // *Россия молодая: передовые технологии — в промышленность*. 2011. № 1. С. 115–116.

- Григорьев С. Н., Гурин В. Д., Козочкин М. П. [и др.]. *Диагностика автоматизированного производства* / под ред. С. Н. Григорьева. Москва: Машиностроение, 2011. 600 с.

- Baro P. K., Joshi S. S., Kapoor S. G. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. P. 831–839. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.008.

- Анцев А. В., Пасько Н. И. Особенности оптимизации режимов резания с учетом фактора случайности // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. № 9. С. 15–20. DOI: 10.30987/article_5bd17b459c1d00.72079190.

- Евдокимова О. П., Макашин Д. С. Оптимизация параметров обработки фрезерованием деталей с помощью САМ системы // *Техника и технологии машиностроения: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.*, 26–28 апреля 2022 г. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 108–111.

- Мокрицкий Б. Я., Космынин А. В., Серебренникова А. Г., Саблин П. А. Фрезерование высокотвердых материалов с обеспечением рационального состояния технологической системы резания. Часть 1 // *Металлообработка*. 2023. № 1 (133). С. 21–26. DOI: 10.25960/mo.2023.1.21.

- Antsev A. V., Zhmurin V. V., Yanov E. S. [et al.]. Cutting tool wear monitoring using the diagnostic capabilities of modern CNC machines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. 032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032003.

- Бреев С. В. Повышение качества обработанной поверхности при цилиндрическом фрезеровании на основе исследования напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования: дис. канд. тех. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2011. 151 с.

- Елкин М. С., Безъязычный В. Ф. Влияние покрытия режущего инструмента на силу резания при финишном концевом фрезеровании // *XIII Королёвские чтения: Междунар. молодёж. науч. конф.: сб. тр.* Самара: Изд-во Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева. 2015. Т. 1. С. 199–200.

- Huang P. B. An intelligent neural-fuzzy model for an in-process surface roughness monitoring system in end milling operations // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2016. Vol. 27 (3). P. 689–700. DOI: 10.1007/s10845-014-0907-6.

- Аверченков А. В. Автоматизированный выбор металлорежущего инструмента для механической обработки заготовок деталей машин // *Научное машиностроение*. 2012. № 9. С. 27–31.

- Любезный М. М. 5 стратегий обработки для фрезерования — базовые и расширенные методы фрезерования. URL: <http://engcrafts.com/item/2050-frezzerovanie> (дата обращения: 06.02.2023).

15. Жияев А. С. Исследование влияния геометрии концевой фрезы на силу и температуру в зоне резания // Развитие науки и технологий: проблемы и перспективы развития: сб. науч. тр. Санкт-Петербург: Изд-во: НОО Профессиональная наука. 2017. С. 206–214.

16. Nghiep T. N., Ahmed A. D. Sarhan, Hideki A. Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy // *Measurement*. 2018. Vol. 125. P. 476–495. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.011.

МАКАШИН Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного ин-

ститута Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1763-1883

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

Для цитирования

Макашин Д. С. Анализ силы резания при фрезеровании закаленной стали // *Омский научный вестник*. 2023. № 3 (187). С. 45–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-45-51.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.

© Д. С. Макашин

UDC 621.95:669.295

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-45-51

EDN: EYGUCN

D. S. MAKASHIN

Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia

THE ANALYSIS OF CUTTING FORCES FOR HARDENED STEEL MILLING

Micro milling is a widely used manufacturing method. The main purpose of this study is to analyze the cutting forces in corrosion-resistant, heat-resistant steel 14Kh17N2. Studies of the full factorial experiment on the processing of steel 14Kh17N2 are carried out using a micro end mill with AlTiN coating. New mathematical models of cutting force and axial force have been developed that are adequately able to predict and optimize the forces acting on the cutting tool. Graphs have been obtained for calculating the minimum required feed per tooth and depth of cut, at which maximum cutting forces and axial forces are provided, which makes it possible to increase the durability of the cutting tool during microfilming. The obtained mathematical models describe the obtained experimental data with 90% or more accuracy.

Keywords: production, cutter, cutting forces, feed per tooth, milling strategy, counter milling, helical milling, groove milling.

References

- Xu G., Chen J., Zhou H. [et al.]. Multi-objective feedrate optimization method of end milling using the internal data of the CNC system // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. P. 715–731. DOI: 10.1007/s00170-018-2923-8. (In Engl.).
- Volkov D. I., Proskuryakov S. L. Razrabotka modeli protsessa rezaniya s uchetom tsiklichnosti formirovaniya struzhki [Development of process models including cutting cycle formation chip] // *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik USATU*. 2011. Vol. 15, no. 3 (43). P. 72–78. (In Russ.).
- Rasshchupkin A. V., Makashin D. S. Povysheniye tochnosti formoobrazovaniya poverkhnosti tverdosplavnym oseвым instrumentom [Improving the accuracy of surface shaping with a hard-alloy axial tool] // *Rossiya molodaya: peredovyye tekhnologii — v promyshlennost'. Russia is Young: Advanced Technologies for Industry*. 2011. No. 1. P. 115–116. (In Russ.).
- Grigor'yev S. N., Gurin V. D., Kozochkin M. P. [et al.]. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva [Diagnostics of automated production] / ed. by S. N. Grigor'yeva. Moscow, 2011. 600 p. (In Russ.).
- Baro P. K., Joshi S. S., Kapoor S. G. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45. P. 831–839. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.008. (In Engl.).
- Antsev A. V., Pas'ko N. I. Osobennosti optimizatsii rezhimov rezaniya s uchetom faktora sluchaynosti [Peculiarities of cutting mode optimization taking into account random factor] // *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2018. No. 9. P. 15–20. DOI: 10.30987/article_5bd17b459c1d00.72079190. (In Russ.).
- Evdokimova O. P., Makashin D. S. Optimizatsiya parametrov obrabotki frezerovaniyem detaley s pomoshch'yu CAM sistemy [Optimization of machining parameters by milling parts using the CAM system] // *Tekhnika i tekhnologii mashinostroyeniya. Technique and Technologies of Engineering*. Omsk. P. 108–111. (In Russ.).
- Mokritskiy B. Ya., Kosmynin A. V., Serebrennikova A. G., Sablin P. A. Frezerovaniye vysokotverdykh materialov s

- obespecheniyem ratsional'nogo sostoyaniya tekhnologicheskoy sistemy rezaniya. Chast' 1 [Milling of highly hard materials with ensuring the rational state of the technological cutting system. Part 1] // *Metalloobrabotka. Metalworking*. 2023. No. 1 (133). P. 21–26. DOI: 10.25960/mo.2023.1.21. (In Russ.).
9. Antsev A. V., Zhmurin V. V., Yanov E. S. [et al.]. Cutting tool wear monitoring using the diagnostic capabilities of modern CNC machines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. 032003. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032003. (In Russ.).
10. Breyev S. V. Povysheniye kachestva obrabotannoy poverkhnosti pri tsilindricheskom frezerovanii na osnove issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zony struzhkoobrazovaniya [Improving the quality of the machined surface during cylindrical milling based on the study of the stress-strain state of the chip formation zone]. *Komsomolsk-on-Amur*, 2011. 151 p. (In Russ.).
11. Elkin M. S., Bez'yazychnyy V. F. Vliyaniye pokrytiya rezhushchego instrumenta na silu rezaniya pri finishnom kontsevom frezerovanii [Influence of the coating of the cutting tool on the cutting force during finishing end milling] // XIII Korolevskie chteniya. *XIII Korolev Readings*. 2015. P. 199–200. (In Russ.).
12. Huang P. B. An intelligent neural-fuzzy model for an in-process surface roughness monitoring system in end milling operations // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2016. Vol. 27 (3). P. 689–700. DOI: 10.1007/s10845-014-0907-6. (In Engl.).
13. Averchenkov A. V. Avtomatizirovannyi vybor metallovezhushchego instrumenta dlya mekhanicheskoy obrabotki zagotovok detaley mashin [Automated selection of metal-cutting tools for machining blanks of machine parts] // *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. Science-intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2012. No. 9. P. 27–31. (In Russ.).
14. Lyubeznyy M. M. 5 strategiy obrabotki dlya frezerovaniya — bazovyye i rasshirennyye metody frezerovaniya [5 machining strategies for milling — basic and advanced milling methods]. URL: <http://engcrafts.com/item/2050-frezerovanie> (accessed: 02.06.2023). (In Russ.).
15. Zhilyayev A. S. Issledovaniye vliyaniya geometrii kontsevoy frezy na silu i temperaturu v zone rezaniya [Research influence geometry of end mill on force and temperature in cutting zone] // *Razvitiye nauki i tekhnologii: problemy i perspektivy razvitiya. Development of Science and Technology: Problems and Development Prospects*. SaintPetersburg. 2017. P. 206–214. (In Russ.).
16. Nghiep T. N., Ahmed A. D. Sarhan, Hideki A. Analysis of tool deflection errors in precision CNC end milling of aerospace aluminum 6061-T6 alloy // *Measurement*. 2018. Vol. 125. P. 476–495. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.05.011. (In Engl.).

MAKASHIN Dmitriy Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal-cutting Machines and Tools Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University, Omsk.

For citations

Makashin D. S. The analysis of cutting forces for hardened steel milling // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 45–51. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-45-51.

Received March 07, 2023.

© D. S. Makashin

¹Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск²Омский государственный технический университет,
г. Омск

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР КАТАНИЯ ТИПА «ЦИЛИНДР В ЦИЛИНДРЕ»

Статья посвящена исследованию специфических кинематических пар, применяемых во многих областях машиностроения: так называемых «пар катания», используемых во многих механизмах. Исследование основано на подробном изучении структуры соединения типа «цилиндр в цилиндре», рассмотрены их геометрические параметры. Анализ был рассмотрен по расположению осей цилиндров между собой: когда оси параллельны и когда они пересекаются или перекрещиваются под углом 90° . Данное исследование дополняет данные в теории описания кинематических пар, в частности пар катания, и позволяет синтезировать их новые виды для их рационального использования в механизмах многих отраслей промышленности.

Ключевые слова: кинематическая пара, пара катания, цилиндр, подвижность, связи (неголономные), скольжение, катание, верчение.

Введение. Понятие кинематической пары в теории механизмов и машин является специфическим и объясняется как «подвижное соединение двух соприкасающихся звеньев» [1]. Понятие кинематической «пары катания» было описано А. В. Верховским [2] в своих трудах как частный случай кинематических пар, когда элементами сопряжения являются тела вращения — цилиндры, конусы, шары (сферы) и т.д. В качестве исследования рассмотрим кинематическую пару (КП) «цилиндр-цилиндр», т.е. два звена будут представлять собой цилиндры, и соединяться они будут «внутри». Когда речь идет о степенях свободы одного цилиндра относительно другого, предполагается рассмотрение подвижности кинематической пары катания, которая, как известно, напрямую связана с понятием «связи» кинематической, как ограничение по перемещению, а именно по существующей классификации кинематических пар, известно, что любая кинематическая пара характеризуется своим классом, который определяется количеством связей, налагаемых на пару. Чем меньше связей налагается на кинематическую пару, тем больше подвижность кинематической пары и тем выше кинематическая мобильность механизма. Кроме того, низшие кинематические пары имеют меньший износ, большую нагрузочную способность и поэтому используются наиболее часто. Создание механизмов, имеющих наименьшее число связей, состоящих в основном из низших КП, является одной из наиболее актуальных задач современного машиностроения.

Данные КП катания встречаются в быту и на производстве. Многие из них в виде кинематических соединений: звенья сцепления цепи, подшипники качения с цилиндрическими телами качения,

кинематические пары пятого класса — вращения, четвертого класса — цилиндрические пары, шарниры Гука, КП кулачок-паз, которые используются во многих механизмах робототехники, автоматических конвейерах, металлорежущих станках, устройствах крепления, суппортах и др.

Данное описание опирается на исследования А. В. Верховского, Л. Т. Дворникова и Э. Я. Живаго и дополняет некоторые аспекты, касающиеся КП типа «цилиндр-цилиндр» [2–5]. Кинематические характеристики различных КП качения были подробно описаны в [6, 7], в частности КП «цилиндр в цилиндре». Однако эти данные не отражают общей специфики КП «цилиндр в цилиндре» по движениям, подвижностям и многоконтактности. Особый интерес в кинематических парах представляют неголономные связи [8], которые в КП катания (качения) исследованы в [7–12] и др. Целесообразность данной работы — это обобщение закономерностей описания связей подвижного и неподвижного цилиндров с учетом расположения их осей в пространстве, точек контакта и на основе этого предложить новый вид КП типа «цилиндр в цилиндре», связанный с увеличением подвижности КП, за счёт изменения их формы геометрии. Новизна предлагаемой теории заключается в том, что изменение геометрических параметров одного из цилиндров (подвижного), а именно уменьшением длины его образующей и заменой ее криволинейным участком, в частности дугой окружности, приводит к появлению дополнительной степени свободы: катание этой дуги относительно касательной к ней.

Постановка задачи. Задано сопряжение типа «цилиндр в цилиндре» в виде кинематической пары:

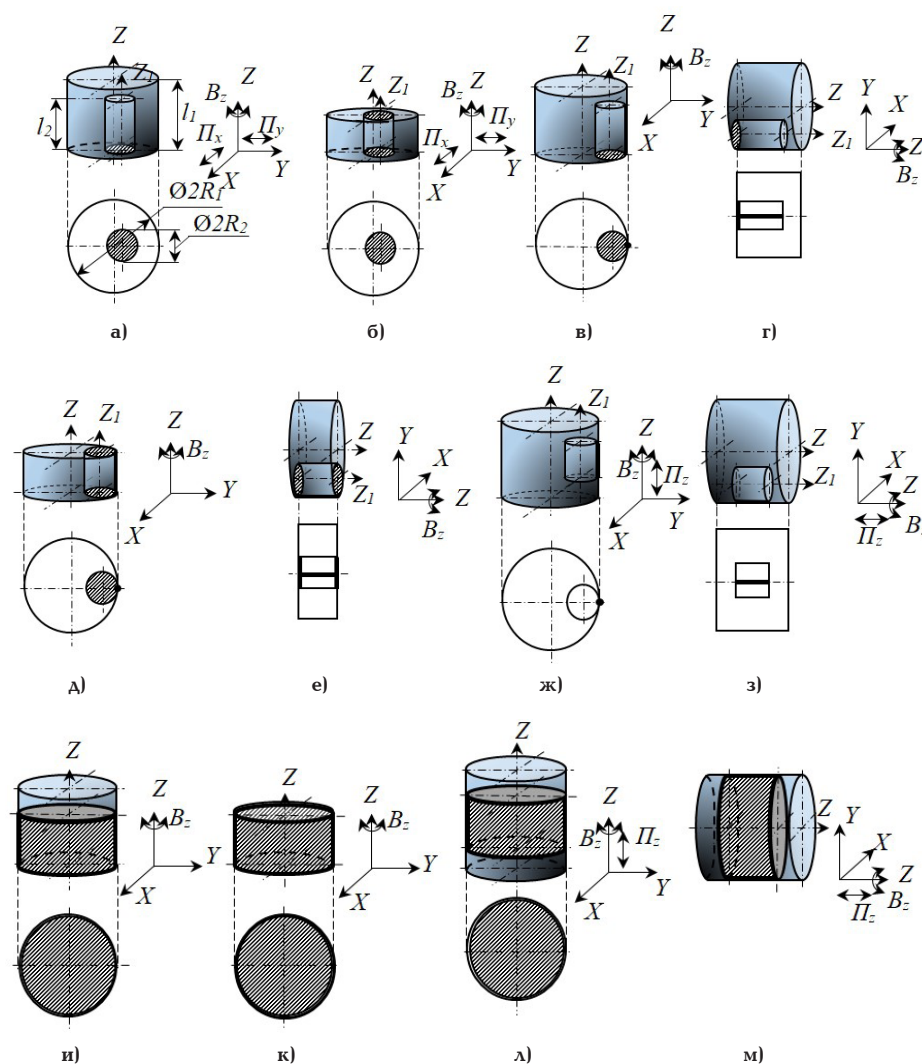


Рис. 1. Сопряжение «цилиндр в цилиндре» при параллельном расположении осей: а — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_1$ пар; б — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_2$ пар; в, г — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_3$ пар; д, е — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_4$ пар; ж, з — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_5$ пар; и — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_6$ пар; к — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_7$ пар; л, м — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_8$ пар

подвижный цилиндр Π_2 внутри неподвижного Π_1 . Известны геометрические параметры этих цилиндров, их ограничения по размерам, а также виды, расположение осей этих цилиндров между собой: 1) параллельны, 2) перпендикулярны и 3) пересекаются под произвольным углом. Кроме того, для каждого варианта определяется степень свободы подвижного цилиндра внутри неподвижного вдоль и вокруг координатных осей, а также сами движения: скольжение (С), катание (К) и верчение (В). Задача исследования: провести анализ сопряжения «цилиндр в цилиндре» $\Pi_1 - \Pi_2$ для их объединения в общую классификацию».

Теория. Из исследований А. В. Верховского [2] известны понятия движения в данных КП: 1) скольжение, 2) качение и 3) верчение. Им были даны следующие определения: скольжение — когда одна точка, принадлежащая одной поверхности, пробегает целый ряд точек, лежащих на другой поверхности; качение — когда одна поверхность вращается по отношению к другой вокруг какой-нибудь линии, лежащей в общей касательной плоскости, причем названная линия проходит через точку касания; верчение — когда одна поверхность вращается по отношению к другой вокруг общей нормали, проведенной в точку касания поверхностей. Все эти виды движений встречаются и в данных КП, и описание

их подвижностей соответствует известной формуле Сомова – Малышева [1]:

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

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

Из формулы (1) видно, что для данного исследования: $n = 1$ и $p_1 = 1$, меняется. Кроме того, вид связи этих цилиндров — точки, прямые и поверхности (плоскости) и их общая совокупность, т.е. данные КП являются или *низшими*, или *высшими* [1].

Описывать различные виды КП катания «цилиндр в цилиндре» будем по следующим характеристикам:

1. Геометрические параметры этих цилиндров и их ограничения:

l_1 — длина образующей «первого» неподвижного цилиндра; R_1 — радиус неподвижного цилиндра; l_2 — длина образующей подвижного цилиндра; R_2 — радиус подвижного цилиндра (рис. 1). Ограничения каждой КП описываются неравенствами: $R_1 \geq 2R_2$ или $R_1 \approx R_2$, а также $l_1 > l_2$ или $l_1 = l_2$. В общем случае, по расположению цилиндров между собой возможно три вида их соединения (сопряжения):

1) *оси цилиндров Π_1 и Π_2 располагаются параллельно между собой;*

2) оси цилиндров Π_1 и Π_2 располагаются перпендикулярно между собой, т.е. либо пересекаются, либо перекрещиваются под углом 90° ;

3) оси цилиндров Π_1 и Π_2 располагаются под некоторым углом α между собой: при $\alpha = 90^\circ$ — это первый случай, при $\alpha = 0^\circ$ — это второй случай.

II. Вид контакта (связи) этих цилиндров и их количество « n_k » — точка, прямая, плоскость и поверхность (цилиндрическая) и их общая совокупность вместе, т.е. многоконтактность: k и n_k КП [3–5], где k — число контактов в КП ($k = 1, 2, \dots, 6$), n_k — общее количество k -контактных пар;

III. Степень подвижности W одного цилиндра внутри другого: учитываются количества движений подвижного цилиндра внутри неподвижного вдоль и вокруг координатных осей W , а также сами движения по сути: скольжение (C), катание (K) и верчение (B) [2, с. 16].

Введём системы отсчета: неподвижная $OXYZ$ — для неподвижного Π_1 и подвижная $O_1X_1Y_1Z_1$ — для подвижного Π_2 .

Рассмотрим первый вид, расположения осей цилиндров Π_1 и Π_2 :

I. Оси цилиндров Π_1 и Π_2 параллельны

Для полного описания характеристик КП Π_1 – Π_2 введем понятие выше-нижней КП — когда сопряжение цилиндров происходит и по точкам (прямым), и по поверхностям (плоскостям).

Составляем перечень структур этих КП, где индекс «пар» обозначает — параллельность осей вращения Π_1 и Π_2 .

1) КП (Π_1 – Π_2)₁^{пар}: Цилиндр Π_2 своим основанием полностью касается основания цилиндра Π_1 по площади $s=\pi R_2^2$ КП — низшая (рис. 1а).

Следуя классификации А. В. Верховского [2, с. 16], движения Π_2 внутри Π_1 можно обозначить следующим образом: $(\Pi_x; \Pi_y; \Pi_z) = C_3(B_{z1}) = B_1(C_1)$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 3, \quad (2)$$

где движение C_3 — скольжение вдоль двух осей X , Y и оси Z_1 вокруг оси Z (вращение вокруг неё); B_1 — верчение вокруг оси Z_1 , которое одновременно может быть и скольжением C_1 вокруг оси Z_1 (рис. 1а).

2) КП (Π_1 – Π_2)₂^{пар}: Π_2 своим основанием полностью касается оснований Π_1 по площадям $s=\pi R_2^2$ КП — низшая (рис. 1б): $(\Pi_x; \Pi_y; \Pi_z) = C_3(B_{z1}) = B_1(C_1)$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 3, \quad (3)$$

3) КП (Π_1 – Π_2)₃^{пар}: Π_2 своим основанием полностью касается основания Π_1 по площади $s=\pi R_2^2$ и касается образующей глиной l_2 поверхности Π_1 . КП — выше-низшая (рис. 1в, г): $(B_z) = C_1$, $(B_{z1}, B_{z2}) = K_1$, $(B_{z1}) = B_1(C_1)$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 5 \cdot 1 = 1, \quad (4)$$

4) КП (Π_1 – Π_2)₄^{пар}: Π_2 своими основаниями полностью касается оснований Π_1 по площадям $s=\pi R_2^2$ и касается образующей глиной l_2 поверхности Π_1 . КП — выше-низшая (рис. 1а, е): $(B_z) = C_1$, $(B_{z1}, B_{z2}) = K_1$, $(B_{z1}) = B_1(C_1)$, $k = 3$ (трехконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 5 \cdot 1 = 1, \quad (5)$$

5) КП (Π_1 – Π_2)₅^{пар}: Π_2 своей образующей касается образующей Π_1 по длине l_2 . КП — высшая (рис. 1ж),

Вид и количество контактов в КП, n_k	Подвижность КП, W			Σn_k
	1	2	3	
Одноконтактные, n_1		2	1	3
Двухконтактные, n_2	2		1	3
Трехконтактные, n_3	2			2
Итого	4	2	2	8

з): $(\Pi_x; B_z; B_{z1}) = C_3$, $(B_{z1}, B_{z2}) = K_1$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (6)$$

6) КП (Π_1 – Π_2)₆^{пар}: Π_2 своим основанием полностью касается основания Π_1 по площади $s=\pi R_2^2$ и полностью касается цилиндрической поверхности высотой l_2 Π_1 . КП — низшая (рис. 1и): $(B_z) = C_1(B_1)$, $(B_z) = C_1(B_1)$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 5 \cdot 1 = 1, \quad (7)$$

7) КП (Π_1 – Π_2)₇^{пар}: Π_2 своими основаниями полностью касается оснований Π_1 по площадям $s=\pi R_2^2$ и полностью касается цилиндрической поверхности высотой $l_2 = l_1$ Π_1 . КП — низшая (рис. 1к): $(B_z) = C_1(B_1)$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 5 \cdot 1 = 1, \quad (8)$$

8) КП (Π_1 – Π_2)₈^{пар}: Π_2 своей цилиндрической поверхностью высотой l_2 и радиусом R_2 касается цилиндрической поверхности Π_1 . КП — низшая (рис. 1л, м): $(\Pi_x; B_z) = C_2$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2. \quad (9)$$

Итого получилось 8 КП и сведём их в табл. 1. Выделим второй вид расположения осей Π_1 и Π_2 :

II. Оси цилиндров Π_1 и Π_2 перпендикулярны (пересекаются или перекрещиваются под углом 90°)

Далее, по аналогии, делаем их анализ, где индекс «пер» обозначает перпендикулярность осей вращения Π_1 и Π_2 , а заштрихованная область — это место контакта поверхностей Π_1 и Π_2 .

1) КП (Π_1 – Π_2)₁^{пер}: Π_2 касается основания Π_1 по своей образующей, глиной l_2 . КП — высшая (рис. 2а): $(\Pi_x; \Pi_y; B_{y1}; B_z) = C_4(\Pi_x; \Pi_{y1}) = K_1$, $B_{z1} = B_1(C_1)$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 4, \quad (10)$$

Из движения $(\Pi_x, B_{y1}) = K_1$ видно, что понятие качение (катание) включает два движения: поступательное перемещение (центра тяжести Π_2) вдоль оси X (Π_x) и повороты Π_2 вокруг оси Y . Таким образом, движение — качение (катание) представляет собой сложное движение, включающее две степени свободы (подвижности).

2) КП (Π_1 – Π_2)₂^{пер}: Π_2 касается верхнего и нижнего оснований Π_1 по двум своим образующим, глиной l_2 . КП — высшая (рис. 2б): $(\Pi_x; \Pi_y; B_{y1}; B_z) = C_4(\Pi_x; \Pi_{y1}) = K_1$, $B_{z1} = B_1(C_1)$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 4, \quad (11)$$

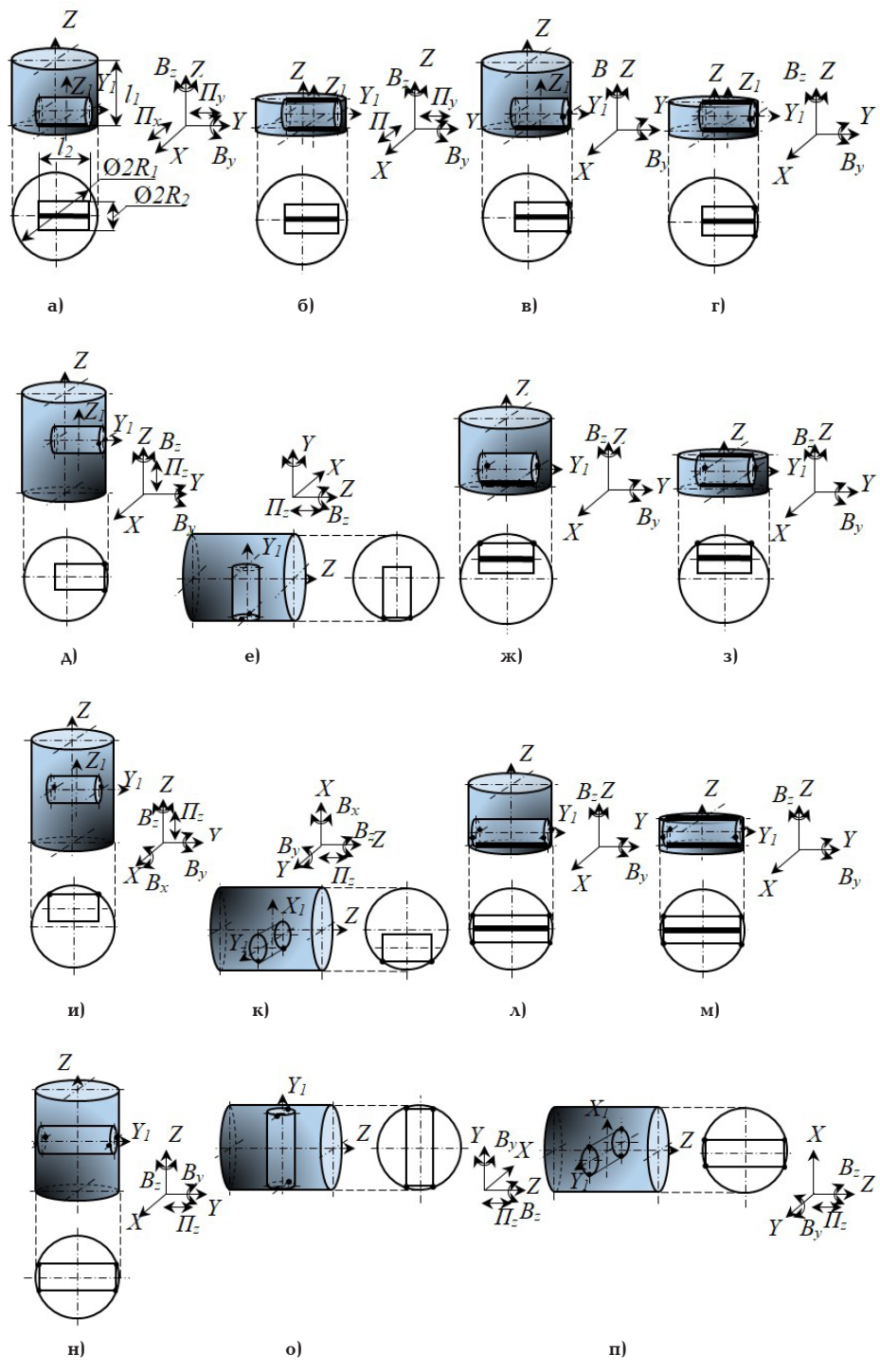


Рис. 2. Сопряжение «цилиндр в цилиндре» при перпендикулярном расположении осей:
 а – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_1^{пер}$; б – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_2^{пер}$; в – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_3^{пер}$; г – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_4^{пер}$;
 д, е – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_5^{пер}$; ж – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_6^{пер}$; з – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_7^{пер}$; и, к – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_8^{пер}$;
 л – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_9^{пер}$; м – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_{10}^{пер}$; н, о, п – КП $(\Pi_1-\Pi_2)_{11}^{пер}$

3) КП $(\Pi_1-\Pi_2)_3^{пер}$: Π_2 касается основания Π_1 по своей образующей глиной l_2 и в двух диаметрально противоположных точках основания на поверхности Π_1 . КП – высшая (рис. 2в): $(B_{y1}; B_z) = C_2$, $k = 3$ (трехконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (12)$$

4) КП $(\Pi_1-\Pi_2)_4^{пер}$: Π_2 касается верхнего и нижнего оснований Π_1 по своим образующим глиной l_2 и в двух диаметрально противоположных точках основания на поверхности Π_1 . КП – высшая (рис. 2г): $(B_{y1}; B_z) = C_2$, $k = 4$ (четырёхконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (13)$$

5) КП $(\Pi_1-\Pi_2)_5^{пер}$: Π_2 касается неподвижного Π_1 в двух диаметрально противоположных точках основания на поверхности Π_1 . КП – высшая (рис. 2д, е): $(\Pi_z; B_{y1}; B_z) = C_3$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 3, \quad (14)$$

6) КП $(\Pi_1-\Pi_2)_6^{пер}$: Π_2 касается основания Π_1 по образующей глиной l_2 и в двух точках оснований на поверхности Π_1 . КП – высшая (рис. 2ж): $(B_{y1}; B_z) = C_2$, $k = 3$ (трехконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (15)$$

Таблица 2

Вид и количество контактов в КП, n_k	Подвижность КП, W				Σn_k
	1	2	3	4	
Одноконтактные, n_1				1	1
Двухконтактные, n_2			1	2	3
Трёхконтактные, n_3		2			2
Четырёхконтактные, n_4		2	1		3
Пятиконтактные, n_5		1			1
Шестиконтактные, n_6		1			1
Итого		6	2	3	11

7) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{7\text{пер}}$: Π_2 касается верхнего и нижнего оснований Π_1 по двум образующим длиной l_2 и в двух точках оснований на поверхности Π_1 . КП — высшая (рис. 2з); $(B_{y1}; B_2) = C_2$, $k = 4$ (четырёхконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (16)$$

8) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{8\text{пер}}$: Π_2 касается Π_1 в двух точках своих оснований на поверхности Π_1 . КП — высшая (рис. 2и, к); $(\Pi_2; B_x; B_{y1}; B_2) = C_4$, $(\Pi_2; B_y) = K_1$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

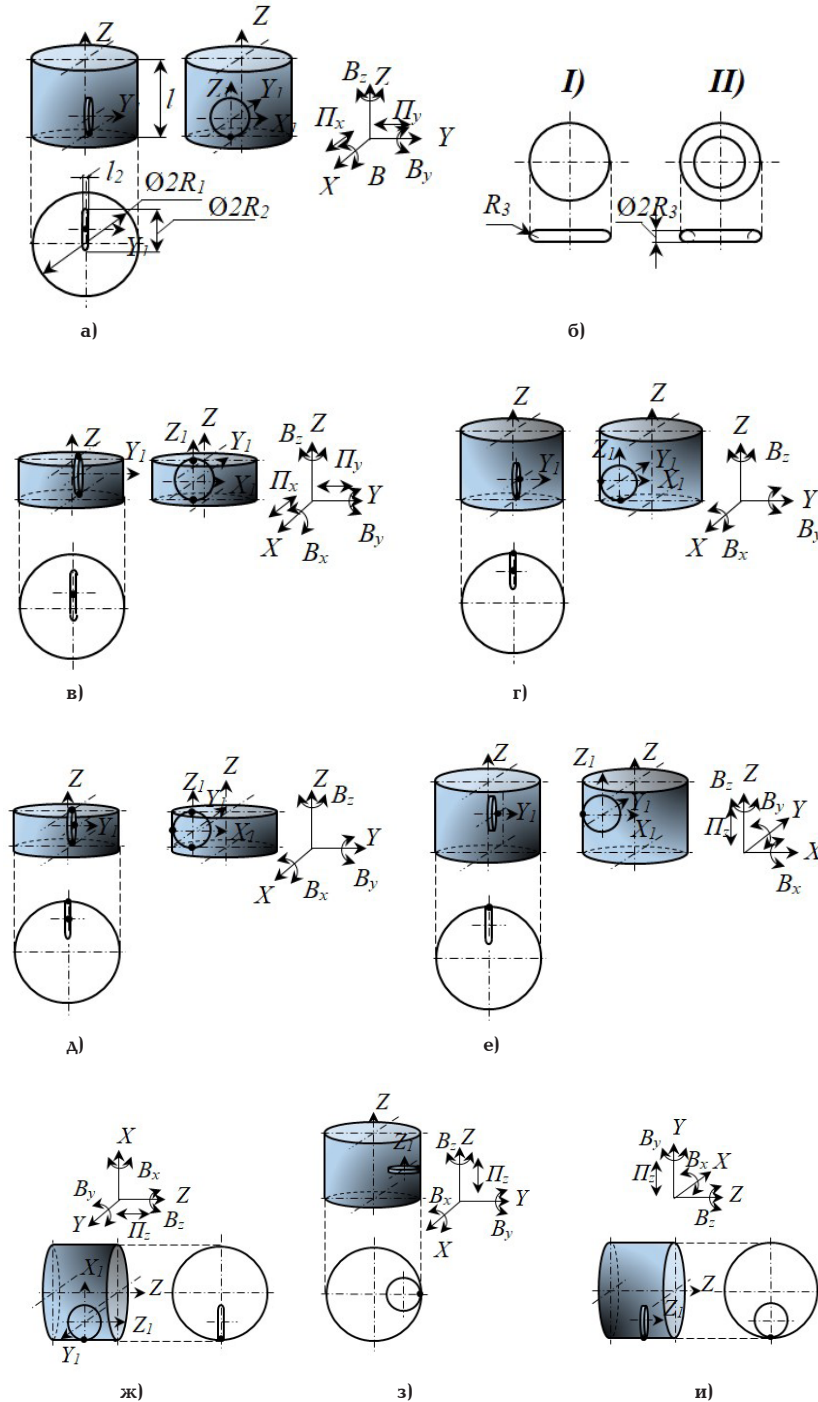


Рис. 3. Сопряжение «цилиндр в цилиндре» в виде диска (тора) внутри цилиндра: а — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{1A\text{пер}}$, б: I — диск-пластина, II — кольцо-шайба (узкий тор); в — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{2A\text{пер}}$; г — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{3A\text{пер}}$; д — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{4A\text{пер}}$; е, ж — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{5A\text{пер}}$; з, и — КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{6A\text{пер}}$

$$W = 6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 4, \quad (17)$$

Таблица 3

Причём вращение B_x возможно не полностью, а в пределах угла поворота $-90^\circ < \varphi_x < 90^\circ$, т.к. при $\varphi_x = \pm 90^\circ$ данная КП преобразуется в **КП** $(\Pi_1 - \Pi_2)_5^{\text{нар}}$ (рис. 1ж, з).

9) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_9^{\text{пер}}$: Π_2 касается основания Π_1 по образующей глиной l_2 и в четырех диаметрально противоположных точках двух своих оснований на поверхности Π_1 . КП — высшая (рис. 2л): $(B_{y1}; B_z) = C_2$, $k = 5$ (пятиконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (18)$$

10) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{10}^{\text{пер}}$: Π_2 касается верхнего и нижнего оснований Π_1 по двум образующим глиной l_2 и в четырёх диаметрально противоположных попарно точках оснований на поверхности Π_1 . КП — высшая (рис. 2м): $(B_{y1}; B_z) = C_2$, $k = 6$ (шестиконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 4 \cdot 1 = 2, \quad (19)$$

11) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{11}^{\text{пер}}$: Π_2 касается Π_1 в четырёх диаметрально противоположных попарно точках своих оснований на поверхности Π_1 . КП — высшая (рис. 2н, о, п): $(\Pi_z; B_{y1}; B_z) = C_3$, $(\Pi_z; B_y) = K_1$, $k = 4$ (четырёхконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 4. \quad (20)$$

Причём вращение B_x возможно не полностью, а в пределах угла поворота $-90^\circ < \varphi_x < 90^\circ$, т.к. при $\varphi_x = \pm 90^\circ$ данная, по аналогии с **КП** $(\Pi_1 - \Pi_2)_8^{\text{пер}}$ (рис. 2и, к) преобразуется в **КП** $(\Pi_1 - \Pi_2)_5^{\text{нар}}$ (рис. 1ж, з).

Итого получилось 11 КП и сведём их в табл. 2.

Наконец рассмотрим *третий вид*, который является частным случаем первых двух: второй подвижный укороченный цилиндр, у которого длина образующей ($l_2 = R_3$) во много раз меньше, чем радиус R_2 представляет собой диск (или шайбу, если цилиндр был полый) (рис. 3а, б):

III. Узкий цилиндр (диск, кольцо) — в цилиндре

Ширину $\Pi_2 - l_2$, считаем очень маленькой: $l_2 \ll R_2$ и её контакт вырождается в точку. Тогда принимаем образующую Π_2 в виде кривой (дуги окружности), радиуса радиусом R_3 . Тогда данный Π_2 вырождается в диск с округлыми краями (кольцо) и может поворачиваться вокруг оси X , т.е. **появляется ещё одна степень свободы**. Такая пластина конструктивно может быть в виде *диска с округлыми краями (узкого тора или кольца)* (рис. 3б). Здесь в обозначении КП: нижний индекс «Д» означает *диск*. Ограничения каждой КП описываются неравенствами: $l_2 = 2R_3 \ll R_2$, $l_1 > 2R_2$ или $l_1 = 2R_2$.

1) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{1A}^{\text{пер}}$: Π_2 (диск, кольцо) касается основания Π_1 в точке. КП — высшая (рис. 3а): $(\Pi_z; B_y; B_{y1}) = C_3$, $(\Pi_z; B_y) = K_1$, $(B_z) = B_1$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 1 = 5, \quad (21)$$

2) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{2A}^{\text{пер}}$: Π_2 (диск, кольцо) касается верхнего и нижнего оснований Π_1 в двух диаметрально противоположных точках. КП — высшая (рис. 3в): $(\Pi_z; B_y; B_{y1}) = C_3$, $(\Pi_z; B_y) = K_1$, $(B_z) = B_1$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 1 = 5, \quad (22)$$

Вид и количество контактов в КП, n_k	Подвижность КП, W					Σn_k
	1	2	3	4	5	
Одноконтактные, n_1				2	1	3
Двухконтактные, n_2			1		1	2
Трёхконтактные, n_3			1			1
Итого			2	2	2	6

Таблица 4

Вид и количество контактов в КП, n_k	Подвижность КП, W					Σk_i
	1	2	3	4	5	
Одноконтактные, n_1		2	1	3	1	7
Двухконтактные, n_2	2		3	2	1	8
Трёхконтактные, n_3	2	2	1			5
Четырёхконтактные, n_4		2	1			3
Пятиконтактные, n_5		1				1
Шестиконтактные, n_6		1				1
Итого	4	8	6	5	2	25

3) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{3A}^{\text{пер}}$: Π_2 (диск, кольцо) касается одного основания Π_1 в одной точке и своей поверхностью касается поверхности Π_1 в одной точке. КП — высшая (рис. 3г): $(B_{y1}; B_z) = C_2$; $(B_x; B_z) = K_2$, $k = 2$ (двухконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 3, \quad (23)$$

4) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{4A}^{\text{пер}}$: Π_2 (диск, кольцо) касается двух оснований Π_1 в двух диаметрально противоположных точках и своей поверхностью касается поверхности Π_1 в одной точке. КП — высшая (рис. 3д): $(B_{y1}; B_z) = C_2$; $(B_x; B_z) = K_2$, $k = 3$ (трехконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 3 \cdot 1 = 3, \quad (24)$$

5) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{5A}^{\text{пер}}$: Π_2 (диск, кольцо) касается одного основания Π_1 в одной точке и своей поверхностью касается поверхности Π_1 в одной точке. КП — высшая (рис. 3е, ж): $(\Pi_z; B_{y1}; B_z) = C_3$, $((\Pi_z; B_y); B_z) = K_2$, $(B_x) = B_1$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 4, \quad (25)$$

6) КП $(\Pi_1 - \Pi_2)_{6A}^{\text{пер}}$: Π_2 (диск, кольцо) касается одного основания Π_1 в одной точке и своей поверхностью касается поверхности Π_1 в одной точке. КП — высшая (рис. 3з, и): $(\Pi_z; B_{z1}; B_z) = C_3$, $((B_z; B_{z1}); B_x) = K_2$, $(B_y) = B_1$, $k = 1$ (одноконтактная КП),

$$W = 6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = 4. \quad (26)$$

Итого получилось шесть КП, сведём их в табл. 3. Объединяя табл. 1, табл. 2 и табл. 3 в одну, получаем табл. 4, в которой объединены все k -контактные пары.

Результаты исследования

1. Выделено 25 видов КП типа $\Pi_1 - \Pi_2$, которые представлены совокупностью трех видов их кинематического соединения, что даёт полную класси-

фикацию данных КП $Ц_1 - Ц_2$; составлены классификационные таблицы этих КП, которые связывают их подвижности, в зависимости от геометрического контакта, от вида, числа движений, а также от количества k -контактных связей (табл. 1 – табл.4), на основании которых, как базисных КП, можно синтезировать большое разнообразие кинематических соединений, обладающих своими кинематическими и динамическими свойствами и определяющих назначение механизма.

2. Определен *новый вид* КП типа $Ц_1 - Ц_2$: диск с округлыми краями (узкий тор или кольцо) внутри цилиндра, в результате чего возникает дополнительная степень свободы, отчего класс КП понижается и увеличивается ее подвижность, что эффективно для многих механизмов в машиностроении; введено специфическое понятие — *высше-нижней пары* (КП $(Ц_1 - Ц_2)_3^{\text{пар}}$, КП $(Ц_1 - Ц_2)_4^{\text{пар}}$), описывающее КП и как высшую, и как низшую, что расширяет сферу исследований в области КП.

Заключение. В результате проведенного исследования геометрических параметров кинематических пар катания типа «цилиндр в цилиндре» синтезированы новые их виды, которые могут быть использованы в механизмах многих отраслей промышленности: в самолетостроении (КП типа $Ц_1 - Ц_2$ в механизмах шасси), на производстве вооружения и военной техники, в транспортном, дорожном и сельскохозяйственном машиностроении (КП типа $Ц_1 - Ц_2$ в роботостроении, кулачковых механизмах с геометрическим замыканием цилиндрического кулачка в профильном пазу автоматических конвейеров, металлорежущих станках — устройствах крепления, суппортах и др.). Именно в этих механизмах наблюдается необходимость увеличения подвижности КП типа $Ц_1 - Ц_2$ за счет изменения формы подвижного цилиндра.

Библиографический список

1. Артоблевский И. И. Теория механизмов и машин. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1988. 640 с.
2. Верховский А. В. Теория пространственных и плоских кинематических пар // Известия Сибирского механико-машиностроительного института. 1933. Т. 1 (52), вып. 1. С. 15–32.
3. Дворников Л. Т., Живаго Э. Я. Основы теории кинематических пар: моногр. Новокузнецк: Издат. центр СибГИУ, 1999. 102 с.
4. Живаго Э. Я. Теория и систематизация кинематических пар механических систем: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2000. 34 с.
5. Дворников Л. Т. Принципиальные уточнения теории кинематических пар // Машиностроение. 2014. № 23. С. 45–73.

6. Marigo A., Bicchi A. Rolling bodies with regular surface: controllability theory and applications // IEEE Transactions on Automatic Control. 2000. Vol. 45, no. 9. P. 1586–1599. DOI: 10.1109/9.880610.

7. Borisov A. V., Mamaev I. S. The rolling body motion of a rigid body on a plane and a sphere. Hierarchy of dynamics // Regular and Chaotic Dyn. 2003. Vol. 7, no. 2. P. 177–200. DOI: 10.1070/RD2002v007n02ABEH000204.

8. Яблонский А. А. Курс теоретической механики. В 2-х ч. Ч. 2. Динамика. Москва: Высшая школа, 1966. 411 с.

9. Karavaev Yu. L., Klekovkin A. V., Kilin A. A. Dynamic model of rolling friction of spherical bodies on a plane without slip // Nelineinaya Dinamika. 2017. Vol. 13, no. 4. P. 599–609. DOI: 10.20537/nd1704012.

10. Bizyaev I. A., Mamaev I. S. Permanent rotations in nonholonomic mechanics. Omnirotational Ellipsoid // Regular and Chaotic Dynamics. 2022. Vol. 27, no. 6. P. 587–612. DOI: 10.1134/S1560354722060016.

11. Li Z., Canny J. Motion of two rigid bodies with rolling constraint // IEEE Trans. on Robotics and Automation. 1990. Vol. 6, no. 1. P. 62–72. DOI: 10.1109/70.88118.

12. Levi M. Geometric phases in the motion of rigid bodies // Arch. Ration. Mech. Anal. 1993. Vol. 122. P. 213–229. DOI: 10.1007/BF00380255.

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

SPIN-код: 4939-6254

AuthorID (РИНЦ): 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ResearcherID: HLN-7822-2023

Адрес для переписки: 1972id@list.ru

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

SPIN-код: 6114-0646

ORCID: 0000-0002-9481-5985

ResearcherID: E-6397-2014

Адрес для переписки: lesnyak.ivan@gmail.com

Для цитирования

Шамутдинов А. Х., Лесняк И. Ю. Анализ кинематических пар катания типа «цилиндр в цилиндре» // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 52–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-52-59.

Статья поступила в редакцию 27.03.2023 г.

© А. Х. Шамутдинов, И. Ю. Лесняк

THE ANALYSIS OF KINEMATIC ROLLING PAIRS SUCH AS «CYLINDER IN CYLINDER»

The article is devoted to the study of specific kinematic pairs used in many areas of mechanical engineering: the so-called «rolling pairs» used in many mechanisms. The study is based on a detailed study of the structure of the «cylinder in cylinder» connection, and their geometric parameters are considered. The analysis is considered by the location of the axes of the cylinders between themselves: when the axes are parallel and when they intersect or intersect at an angle of 90°. This study complements the data in the theory of description of kinematic pairs, in particular, rolling pairs, and makes it possible to synthesize their new types for their rational use in the mechanisms of many industries.

Keywords: kinematic pair, rolling pair, cylinder, mobility, constraints (nonholonomic), sliding, rolling, spinning.

References

1. Artobolevskiy I. I. Teoriya mekhanizmov i mashin [The theory of mechanisms and machines]. 4th ed., revised and supplemented. Moscow, 1988. 640 p. (In Russ.).
2. Verkhovskiy A. V. Teoriya prostranstvennykh i ploskikh kinematicheskikh par [Theory of spatial and plane kinematic pairs] // *Izvestiya Sibirskogo Mekhaniko-Mashinostroitel'nogo Instituta. Proceedings of the Siberian Mechanical Engineering Institute*. 1933. No. 1 (52). P. 15–32. (In Russ.).
3. Dvornikov L. T., Zhivago E. Ya. Osnovy teorii kinematicheskikh par [Fundamentals of the theory of kinematic pairs]. Novokuznetsk, 1999. 102 p. (In Russ.).
4. Zhivago E. Ya. Teoriya i sistematizatsiya kinematicheskikh par mekhanicheskikh sistem [Theory and systematization of kinematic pairs of mechanical systems]. Novosibirsk, 2000. 34 p. (In Russ.).
5. Dvornikov L. T. Printsipial'nyye utochneniya teorii kinematicheskikh par [Fundamental refinements of the theory of kinematic pairs] // *Mashinostroyeniye. Mechanical Engineering*. 2014. № 23. P. 45–73. (In Russ.).
6. Marigo A., Bicchi A. Rolling bodies with regular surface: controllability theory and applications // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2000. Vol. 45, no. 9. P. 1586–1599. DOI: 10.1109/9.880610. (In Engl.).
7. Borisov A. V., Mamaev I. S. The rolling body motion of a rigid body on a plane and a sphere. Hierarchy of dynamics // *Regular and Chaotic Dyn.* 2003. Vol. 7, no. 2. P. 177–200. DOI: 10.1070/RD2002v007n02ABEH000204. (In Engl.).
8. Yablonskiy A. A. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. V 2 ch. Ch. 2. Dinamika [Course of theoretical mechanics. In 2 parts. Part 2. Dynamics]. Moscow, 1966. 411 p. (In Russ.).
9. Karavaev Yu. L., Klekovkin A. V., Kilin A. A. Dynamic model of rolling friction of spherical bodies on a plane without slip // *Nelineinaya Dinamika*. 2017. Vol. 13, no. 4. P. 599–609. DOI: 10.20537/nd1704012. (In Engl.).
10. Bizyaev I. A., Mamaev I. S. Permanent rotations in nonholonomic mechanics. Omnirotational Ellipsoid // *Regular*

and Chaotic Dynamics. 2022. Vol. 27, no. 6. P. 587–612. DOI: 10.1134/S1560354722060016. (In Engl.).

11. Li Z., Canny J. Motion of two rigid bodies with rolling constraint // *IEEE Trans. on Robotics and Automation*. 1990. Vol. 6, no. 1. P. 62–72. DOI: 10.1109/70.88118. (In Engl.).

12. Levi M. Geometric phases in the motion of rigid bodies // *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. 1993. Vol. 122. P. 213–229. DOI: 10.1007/BF00380255. (In Engl.).

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

SPIN-code: 4939-6254

AuthorID (RSCI): 688427

ORCID: 0000-0001-5896-7247

ResearcherID: HLH-7822-2023

Correspondence address: 1972id@list.ru

LESNYAK Ivan Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6114-0646

ResearcherID: E-6397-2014

ORCID: 0000-0002-9481-5985.

Correspondence address: lesnyak.ivan@gmail.com

For citations

Shamutdinov A. Kh., Lesnyak I. Yu. The analysis of kinematic rolling pairs such as «cylinder in cylinder» // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 52–59. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-52-59.

Received March 27, 2023.

© A. Kh. Shamutdinov, I. Yu. Lesnyak

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ХИМИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

В настоящей статье рассматриваются методы бережливого производства, направленные на улучшение управления производственными процессами на химическом предприятии. Объектом исследования является предприятие публичное акционерное общество «Казаньоргсинтез», предметом — применение методов бережливого производства на промышленном предприятии. В статье представлен краткий обзор методов и инструментов бережливого производства, получивших наиболее широкое распространение в российских промышленных предприятиях. На примере производства полиэтилена низкого давления в публичном акционерном обществе «Казаньоргсинтез» разработаны рекомендации по использованию методов бережливого производства для оптимизации производственных процессов, в частности, принципа «Точно в срок», реализация которого происходит посредством использования автоматизированной системы КАНБАН (на этапе производства полиэтилена низкого давления) и модели «вытягивания» (на примере складирования полиэтилена низкого давления). В результате проведенного исследования показана перспективность внедрения методов и инструментов бережливого производства на химическом предприятии.

Ключевые слова: бережливое производство, методы бережливого производства, управление процессами, полиэтилен низкого давления.

Сокращения:

ПАО — Публичное Акционерное Общество
ПНД — полиэтилен низкого давления
БП — бережливое производство
ГОСТ Р — Государственный стандарт России
Завод ПППНД — завод по производству и переработке полиэтилена низкого давления
Завод ОП и ТГ — завод органических продуктов и технических газов

Введение. В современном мире гарантом успешной деятельности и конкурентоспособности предприятия является высокий уровень организации производства. Одним из способов достижения этого уровня является внедрение на предприятии концепции бережливого производства (БП). Применение данной концепции может значительно повысить эффективность производства путем сокращения всех видов потерь и увеличить ценность конечного продукта для потребителя. Практически во всех отраслях ведущих стран мира концепция БП является общепризнанной успешной стратегией индустриального развития.

В нашей стране к исследованию методов БП обратились такие ученые, как К. В. Бельш [1],

М. А. Мирошниченко [2], Н. В. Просвирина [3] и т.д. Ими представлены работы, раскрывающие основные принципы БП и преимущества их использования в различных сферах. В настоящей статье авторами сделан акцент на использование методов БП на химических предприятиях.

Цель исследования. Целью настоящей статьи является разработка предложений по практическому применению методов БП на химическом предприятии с целью оптимизации производственных процессов и получения экономического эффекта.

Основная часть. ПАО «Казаньоргсинтез» — крупнейший отечественный производитель полимеров и сополимеров этилена, ведущее предприятие химической промышленности Российской Федерации. Оно производит полиэтилен (40 % от общероссийского объема производства), поликарбонат (100 % производства отечественного поликарбоната), бисфенол А, полиэтиленовые трубы и другую продукцию. Общий объем годового производства составляет 1,7 миллиона тонн [4]. Среди продуктов, которые производятся на ПАО «Казаньоргсинтез», важное место занимает ПНД. На заводе по производству и переработке полиэтилена низкого давле-

Основные этапы переналадки оборудования

Этап	Осуществление этапа
Демонтаж	Снимаются штампы, оснастка, инструмент, крепеж. Выполняется уборка станка, конвейера. Удаляются детали, инструмент и все остальное.
Установка	Устанавливаются новые штампы, оснастка, инструмент, крепеж. Подвозятся (загружаются) новые детали, инструмент и все остальное.
Настройка	Каждый инструмент или элемент оснастки устанавливается определенным образом, чтобы получить готовое изделие заданных размеров.
Проверка	Выполняется пробный пуск и проверяется соответствие полученного изделия чертежу.

ния ведутся работы по наращиванию мощности реактора «В», продолжается работа по его оснащению системой рекуперации сбросных газов, проводится работа по модернизации реактора «С» и линии компаундирования «Д» с целью увеличения производства бимодального полиэтилена ПЭ-100 [5].

Затрачиваемые средства на указанные работы, а также на производственные процессы ПНД, являются весьма существенными. Поэтому, с целью оптимизации используемых ресурсов, необходимо внедрять концепцию Бережливого производства, включающую в себя комплекс методов и инструментов, способствующих выполнению производственной задачи в сокращенные сроки, с минимальными затратами и с необходимым для заказчика качеством конечного продукта [6].

Согласно ГОСТ Р 56407-2015 «Бережливое производство. Основные методы и инструменты» основными методами бережливого производства являются:

- стандартизация работы;
- организация рабочего пространства 5S;
- картирование потока ценности (VSM);
- быстрая переналадка (SMED);
- визуализация;
- защита от непреднамеренных ошибок (Рока-Йоке);
- всеобщее обслуживание оборудования (TPM);

Также важной составной частью БП является система КАНБАН [7].

Охарактеризуем вкратце данные методы и систему КАНБАН, чтобы выбрать из них наиболее эффективные и подходящие к рассматриваемому процессу.

Стандартизация работы — метод, позволяющий организовать безопасное эффективное производство. В качестве инструментов стандартизации используются хронометраж и нормирование.

Задачами стандартизации работы являются:

- обеспечение стабильно высокого и качественного результата деятельности;
- создание условий для безопасности производства;
- сокращение всех видов потерь;
- создание механизма выявления отклонений при выполнении операций;
- обеспечение динамичности и наглядности в обучении персонала.
- создание условий для постоянного совершенствования [8].

Метод «5S» (Sort – Set in Order – Shine – Standardize – Sustain) представляет собой совокупность пяти последовательно выполняемых принципов:

- сортировка. На данном этапе происходит сортировка всех предметов рабочего места и, в зависимости от их необходимости, все предметы сортируются на нужные и ненужные;
- соблюдение порядка. На этом этапе необходимо определить место для каждого предмета, исходя из частоты его использования. Далее следует визуализировать места хранения предметов, а также провести маркировку предметов. Необходимо также обозначить места потенциальной опасности, нанести обозначения на инструменты, сырье, продукцию и т.д.;
- содержание в чистоте. На данном этапе определяются потенциальные источники загрязнения рабочего пространства и правила уборки, в том чис-

ле ее периодичность, способы ее проведения и инструменты (инструменты для уборки всегда должны находиться в рабочем состоянии);

- стандартизация. Создаются стандарты содержания рабочих мест (они могут включать в себя схемы с указанием рабочих, в том числе опасных зон, краткие инструкции или памятки);

- совершенствование. Это самый важный этап метода «5S». На данном этапе происходит оценка всех ранее принятых в процессе проведения предыдущих четырех этапов решений, анализируются все допущенные ошибки и находятся пути их исправления. Данный алгоритм принимает форму «спирали» (каждый последующий этап становится более совершенным). Он призван преобразовать данный метод в культуру организации, в которой каждый работник автоматически выполняет данные действия [9].

Следующий метод — «VSM» предполагает создание визуальной модели информационных и материальных потоков (поток — это совокупность действий, отражающих процесс создания ценностей), требуемых для выполнения заказа потребителя. Целью данного метода является визуальное представление потока создания ценности для нахождения и устранения/сокращения всех видов потерь и улучшение потока создания ценности в результате учтенных потерь.

Метод «SMED» подразумевает сокращение длительности остановки станка во время его переналадки. Целями применения данного метода являются: уменьшение времени простоя оборудования; сокращение элементов «незавершенного производства» (продукции, не прошедшей всех стадий, предусмотренных технологическим процессом, а также изделий, которые не были укомплектованы, испытаны и не прошли техническую приемку); расширение ассортимента выпускаемой продукции. Основные этапы переналадки оборудования перечислены в табл. 1.

Метод «Визуализация» предполагает совокупность действий, которые способствуют такому расположению всех элементов системы (инструментов, деталей и т.д.), чтобы каждый участник производственного процесса мог максимально быстро оценить состояние этой системы.

Визуализацию можно рассматривать в двух аспектах:

— как метод представления информации в виде оптического изображения (рисунков, диаграмм, графиков, структурных схем, карт, таблиц и т.д.);

— как размещение всех инструментов, собираемых узлов, деталей, информации о производственном процессе так, чтобы они были видны с первого взгляда [10].

Метод «Рока-Йоке». В случае отсутствия на предприятии надежной превентивной системы и встроенной защиты от ошибок в процессе производства возникают различные виды потерь. При допущенной ошибке во время работы с изделием, передав его на следующий этап производства или же покупателю, производитель воспринимает переделку как неотъемлемую часть рабочего процесса.

Для устранения данного вида потерь необходимо выявить незавершенные изделия, которые нуждаются в переделке, и законченные продукты, являющиеся дефектными. Следующий шаг по сокращению потерь — разработка полных стандартных операционных процедур и усовершенствование системы визуального контроля. Система защиты от ошибок «Рока-Йоке» позволит минимизировать скрытые потери там, где скрывается источник ошибок [11].

Метод «ТРМ» направлен на повышение эффективности оборудования за счет обслуживания, которое предотвращает сбой в его работе. В большей степени ТРМ строится на предсказуемости и предотвращении поломок и, в меньшей степени, на исправлении поломок. Отличительной особенностью ТРМ является вовлеченность в работу всего персонала (отсюда и название метода). Метод ТРМ построен на основе стабилизации и непрерывного улучшения процессов технического обслуживания, системы планового предупредительного ремонта, работы по принципу «ноль дефектов» [12].

Важной составной частью БП также является система КАНБАН. Данная система базируется на визуализации идеи, связанной с достижением баланса между работой, запрошенной потребителем, и возможностями производства. Данная система представляет собой технологию, которая обеспечивает производство требуемого объема продукции, предоставляемой потребителю «точно вовремя» на основе модели вытягивания. Суть данной системы в том, что субъект не начинает работать без определенного сигнала от внешнего или внутреннего заказчика. Таким сигналом может быть документ, устное распоряжение, карточка и др. Другими словами, происходит создание непрерывного материального потока, для которого, в силу правильно организованной логистики, не требуется лишних складских помещений. Это связано с тем, что для процесса производства поставляются только необходимые компоненты и только вовремя (минуя склады). Готовая продукция также не накапливается на складах, а сразу поставляется потребителю.

Для этой цели в системе КАНБАН существует наряд-заказ на определенную работу — «контрольная карточка». Возникает целая сигнальная система, так как карта закрепляется за каждым элементом производства. Все карточки делятся на «канбаны перемещения» и «канбаны производства». «Канбаны перемещения» указывают — куда и откуда перемещаются детали и делятся на карточки поставки и карточки изъятия. «Канбаны производства» курируют выполнение конкретных производственных операций и делятся на карточки заказа и сигнальные карточки [13].



Рис. 1. Схема движения материальных потоков создания ПНД

Систему КАНБАН на химическом предприятии целесообразно применять непосредственно на этапе производства химической продукции, в нашем случае — ПНД, так как этот этап жизненного цикла является наиболее важным. Именно здесь формируется качество конечного продукта. Помимо этого, данный этап характеризуется высокой степенью опасности для работников предприятия, и вышеназванные методы способны снизить степень рисков [14].

Химическое непрерывное производство зависит от колебаний количества поступающих материалов. Это может вызвать перебои в работе агрегатов или их остановку. В случае остановки одного из агрегатов будет нарушена непрерывность всего процесса производства. Такая остановка повлечет за собой ряд негативных последствий. После устранения причины установки потребуется запустить производство заново. Такая неритмичная работа приведет к большим потерям рабочего времени, дополнительным энергетическим затратам, увеличению незавершенного производства, изнашиванию оборудования, перерасходу сырья. Поэтому для непрерывного производства необходимо создавать условия для высокой синхронизации и выравнивания всего производства. Именно для этого и требуется применение принципа «Точно в срок». Его основная задача — подача материалов от предыдущего этапа производства в последующий этап в точно назначенное время и в точно установленном количестве (без создания избыточного запаса).

Химическое производство как непрерывное производство характеризуется тем, что все материалы находятся в постоянном движении, и, кроме того, скорость этого движения на разных этапах производства является различной. Производственная установка производства ПНД представляет собой совокупность последовательно расположенных аппаратов, соединенных трубопроводами [15]. Схема движения материальных потоков создания ПНД изображена на рис. 1.

Сырье со склада (1) (этилен, бутиден, водород, необходимые катализаторы) по трубопроводу поступает в компрессор (2), где постепенно сжимается до необходимого давления. Далее непрерывным потоком этилен отправляется в реактор (3), в котором происходит полимеризация этилена. В зависимости от марки будущего ПНД поддерживается специальный режим температуры и давления. В реакторе (3) за один проход до 20 % поступающего этилена превращается в полиэтилен. Смесь расплава поли-



Рис. 2. Автоматизированная система КАНБАН



Рис. 3. Схема движения материальных потоков создания ПНД с применением автоматизированной системы КАНБАН на заводе ПППНД

этилена и непрореагировавшего этилена поступает в газоотделитель (4), где полимер отделяется от газа. Газ охлаждается, промывается (5) и возвращается на полимеризацию в реактор (3). Расплавленный полимер поступает в емкость для продувки (6). После продувки полимера азотом в аппарате он отправляется на грануляцию в экструзионную установку (7). Для такого ритма работы необходимо использование постоянной информационной системы о количестве материала на каждом этапе цепочки производства, необходимости его передачи в следующее звено и т.д. Такая система является фактически тем, что традиционно в бережливом производстве называется КАНБАН. Это своего рода его аналог — автоматизированный КАНБАН. Он отличается тем, что количество вещества и его передача на следующий этап осуществляется автоматически, а функцию условной «карточки» выполняет диаграмма прибора. Пример такой системы приведен на рис. 2.

Таким образом, при применении данной системы к процессу производства ПНД схема движения материальных потоков создания ПНД примет несколько иной вид (рис. 3).

Одним из важных компонентов принципа «Точно в срок» является модель «вытягивания». Ее использование позволяет минимизировать потери [16]. Но для непрерывного химического производства,

как в случае производства ПНД, характерен синтез «вытягивающей» и «выталкивающей» моделей. На химическом производстве частично действует модель «вытягивания» (выработка продукции начинается при наличии заказа — внешнего или внутреннего). Ключевую роль в производственной линии играет реактор («внутренний заказчик»), который вытягивает необходимое количество материала из предыдущих этапов цепочки производства. После прохождения материала через реактор система производства меняет свой принцип работы и начинает строиться на «выталкивающей» модели на всех этапах цепочки производства до этапа складирования [17]. Важно, чтобы все этапы цепочки производства ПНД (следующие после прохождения материала через реактор) не накапливали излишков материалов в большом количестве. Все этапы цепочки производства ПНД должны быть синхронизированы, а это, в свою очередь, также может быть обеспечено за счет использования автоматизированной системы КАНБАН, которая должна применяться на каждом этапе цепочки производства ПНД.

Помимо самого процесса производства ПНД, который в большей степени является автоматизированным, принцип «Точно в срок» применим и к другим этапам жизненного цикла производства ПНД. Так, данный принцип будет способствовать ряду улучшений на этапах складирования готового ПНД.

Все сырье и реагенты для производства ПНД на заводе ПППНД поступают с завода ОП и ТГ, следовательно, этап закупок отработан (предположительно принцип «Точно в срок» применяется в данном случае как комплексный механизм для одновременного производства и подачи сырья заводу ПППНД). В рамках принципа «Точно в срок» мы рассматриваем этап производства ПНД с точки зрения времени его начала. Это время должно напрямую соотноситься со временем конечной отгрузки готовой продукции потребителю [18]. Тогда ПАО «Казаньоргсинтез» сможет избежать ненужных затрат на этапе складирования готовой продукции и ее отгрузки.

Вместе с тем склад готовой продукции на ПАО «Казаньоргсинтез» является обязательным структурным компонентом, так как могут произойти какие-либо непредвиденные ситуации, связанные с неожиданным изменением спроса потребителя. Принцип «Точно в срок» позволяет не миновать этап складирования готовой продукции, а существенно сократить площадь имеющихся складов, так как производство принимает вид «вытягивающей» модели управления, которая позволяет не скапливать больших объемов готовой продукции [19]. Схема «вытягивающей» модели управления на заводе ПППНД представлена на рис. 4.

Представим планируемый результат от внедрения автоматизированной системы КАНБАН с указанием вышерассмотренных этапов жизненного цикла ПНД — производства ПНД и складирования ПНД (табл. 2).

Таким образом, для решения ряда существующих проблем, а также с целью снижения вероятности возникновения ряда опасностей при производстве ПНД, среди которых: возможность внезапных остановок оборудования, отсутствие четкой системы контроля за количеством поступающих и передаваемых материалов, возможность возникновения чрезвычайных ситуаций, из всех рассмотренных методов БП следует сосредоточить внимание

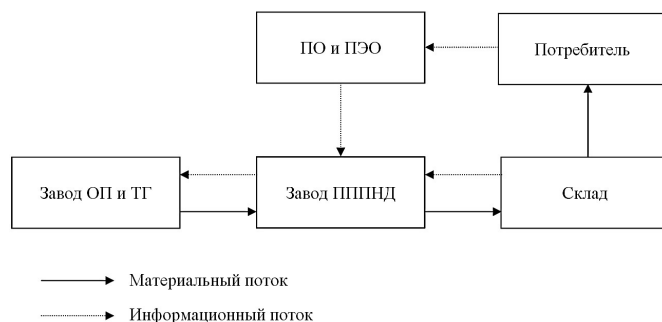


Рис. 4. Схема предлагаемой «вытягивающей» модели управления

Таблица 2

Планируемый результат от внедрения системы КАНБАН на производстве ПНД

Метод	Этап жизненного цикла	До внедрения	После внедрения
Автоматизированный КАНБАН	Производство ПНД	Существование рисков потенциальной опасности (ЧС); возможность внезапных остановок оборудования; потеря рабочего времени на переналадку или настройку оборудования; отсутствие четкой системы контроля за количеством поступающих и передаваемых материалов на каждом этапе цепочки производства ПНД.	Обеспечение процесса производства ПНД дополнительным уровнем безопасности (так как любая потенциальная опасность, которая может привести к ЧС, будет заранее отслежена посредством автоматизированной системы); предотвращение внезапных остановок оборудования; сокращение потерь рабочего времени (на переналадку или настройку оборудования); система постоянного информационного оповещения о количестве материала на каждом этапе цепочки производства, о необходимости его передачи в следующее звено.
Модель «вытягивания»	Складирование ПНД	Наличие больших складских помещений.	Существенное сокращение площади имеющихся складов, так как производство принимает вид «вытягивающей» модели управления, которая позволяет не скапливать больших объемов готовой продукции.

на использовании автоматизированной системы КАНБАН как решающей все вышеперечисленные проблемы.

Выводы и заключение

Из проведенного исследования следует, что принцип «Точно в срок», как часть концепции БП, играет важную роль в улучшении управления производственными процессами, в частности — процессом производства ПНД. При применении данного принципа при производстве ПНД рекомендуется использовать систему КАНБАН, однако не систему КАНБАН в традиционном понимании, а автоматизированную информационную систему, адаптированную к специфике химического производства. Данная система позволяет достичь высоких результатов за счет автоматического определения количества исходного вещества и его передачи на следующий этап производства с помощью диаграммы прибора, которая будет выполнять функцию условной «карточки». Движение материальных потоков создания ПНД при таком условии позволяет минимизировать потери, так как используется синтез «вытягивающей» и «выталкивающей» моделей организации производства. Благодаря внедрению автоматизированной системы КАНБАН улучшится процесс управления производством ПНД и в результате автоматизированного слежения и контроля снизится степень риска возникновения чрезвычайных ситуаций. Также данная система способна рационализи-

ровать процесс складирования готового ПНД, существенно сократив площадь имеющихся складов, так как производство примет форму «вытягивающей» модели управления.

Все обозначенные выше методы позволяют не только повысить безопасность процесса производства, сократить потери рабочего времени, оптимизировать используемые площади, но и получить ощутимый экономический эффект за счет увеличения рентабельности производства вследствие сокращения издержек.

Библиографический список

1. Бельш К. В. Организация бережливого производства на промышленных предприятиях // Лин-технологии: Бережливое производство. 2018. № 5.
2. Мирошниченко М. А., Голобородько Е. О., Сарычева И. Н. Методология эффективного управления на основе принципов бережливого производства // Вестник Академии знаний. 2020. № 2 (37). С. 179–183. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10161.
3. Просвирова Н. В., Тихонов А. И. Особенности управления производственным процессом промышленного предприятия на основе концепции бережливого производства // Московский экономический журнал. 2019. № 11. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10152.
4. ПАО «Казаньоргсинтез». URL: <https://kazanorgsintez.ru> (дата обращения: 02.04.2023).

5. Годовой отчет // ПАО «Казаньоргсинтез» / Ф. Г. Минигулов. 2021. С. 1–91.
6. Селиверстов А. С., Постнов В. В., Лукина В. В. Система 5S как метод повышения эффективности деятельности предприятия // Молодой ученый. 2020. № 42 (332). С. 132–134.
7. ГОСТ Р 56407-2015. Бережливое производство. Основные методы и инструменты. Введ. 2015–06–02. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200120649> (дата обращения: 13.02.2023).
8. Процесс стандартизации работы в организации: как и зачем. URL: <http://arprime.ru/avtomatizacia/standartizatsiya-raboty-deyatelnosti-i-protsesov-proizvodstva> (дата обращения: 18.02.2023).
9. Васильева С. Е., Данилова С. Ю. Методика внедрения инструмента бережливого производства 5S // Молодой ученый. 2016. № 13 (117). С. 388–393.
10. Visualization – творческий способ применения Lean. URL: <https://worksection.com/blog/visualization-lean.html> (дата обращения: 24.02.2023).
11. Иванова Т. Пока-ёкэ как метод устранения скрытых потерь на предприятии // Проблемы экономики и менеджмента. 2014. № 7 (35). С. 33–35.
12. Степанова К. М., Суцев А. К. Организация обслуживания оборудования по методу ТРМ в производстве автокомпонентов // Современные материалы, техника и технологии. 2018. №1 (16). С. 72–77.
13. КАНБАН: краткое руководство. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/upravlenie/vyuchit-kanban/kanban-kratkoe-rukovodstvo> (дата обращения: 04.03.2023).
14. Недбайлюк Б. Е., Антонова И. И., Антонов С. А. [и др.]. Методы бережливого производства в непрерывных производственных процессах // Актуальные проблемы экономики и права. 2011. № 1 (17). С. 102–110.
15. Котляр Е. В., Пушкарева Е. М. Система управления проектами КАНБАН // Бизнес-образование в экономике знаний. 2020. №1 (15). С. 57–59.
16. Денисова Я. В., Петрова А. С., Сопин В. Ф. Оптимизация производственного процесса путем внедрения методов бережливого производства // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Т. 84, № 2. С. 315–323. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-315-323.
17. Вейдер М. Инструменты бережливого производства: карманное руководство по практике применения Lean: пер. с англ. Москва: Альпина Паблишер, 2005. Р. 86–87.
18. Ротер М. Тойота Ката: лидерство, менеджмент и развитие сотрудников для достижения выдающихся результатов / пер. с англ. М. Самсонова. Санкт-Петербург: Питер, 2014. 304 р.
19. Андерсен Б. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования. Москва: РИА Стандарты и качество, 2003. 272 с.

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

ORCID: 0009-0000-3389-4221

Адрес для переписки: maks228sh@gmail.com

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

SPIN-код: 3706-5320

AuthorID (РИНЦ): 973897

ORCID: 0000-0003-1242-6909

Адрес для переписки: yana-denisova@inbox.ru

Для цитирования

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

Статья поступила в редакцию 27.03.2023 г.

© М. О. Шальнев, Я. В. Денисова

APPLYING LEAN MANUFACTURING PRACTICES TO IMPROVE PROCESS CONTROL IN A CHEMICAL PLANT

This article discusses lean manufacturing methods aimed at improving the management of production processes in a chemical plant. The object of the study is the concept of lean production, the subject is the use of its methods in the production of low density polyethylene in the public joint-stock company Kazanorgsintez.

The article provides a brief overview of the methods and tools of lean manufacturing, which are most widely used in Russian industrial enterprises. Based on the example of low-density polyethylene production in Kazanorgsintez Public Joint-Stock Company, recommendations have been developed on the use of lean manufacturing methods to optimize production processes, in particular, the Just-in-Time principle, which is implemented through the use of the automated KANBAN system (at the stage of production of low-density polyethylene) and the "pull" model (on the example of low-density polyethylene storage). As a result of the study, the prospects for the introduction of methods and tools of lean production at a chemical enterprise are shown.

Keywords: lean production, lean production methods, process control, low density polyethylene.

References

1. Belysh K. V. Organizatsiya berezhlivogo proizvodstva na promyshlennykh predpriyatiyakh [Organization of lean production at industrial enterprises] // *Lin-tehnologii: Berezhlivoye proizvodstvo. Lean Technology: Lean Manufacturing*. 2018. No. 5. (In Russ.).
2. Miroshnichenko M. A., Goloborod'ko E. O., Sarycheva I. N. Metodologiya effektivnogo upravleniya na osnove printsipov berezhlivogo proizvodstva [Effective management methodology based on the principles of lean manufacturing] // *Vestnik Akademii znaniy. Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2020. No. 2 (37). P. 179–183. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10161. (In Russ.).
3. Prosvirina N. V., Tikhonov A. I. Osobennosti upravleniya proizvodstvennym protsessom promyshlennogo predpriyatiya na osnove kontseptsii berezhlivogo proizvodstva [Features of managing the production process of an industrial enterprise based on the concept of lean manufacturing] // *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal. Moscow Economic Journal*. 2019. No. 11. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10152. (In Russ.).
4. PAO «Kazan'orgsintez» [PJSC «Kazanorgsintez»]. URL: <https://kazanorgsintez.ru> (accessed: 02.04.2023). (In Russ.).
5. Godovoy otchet [Annual report] // PAO «Kazan'orgsintez». PJSC «Kazanorgsintez» / F. G. Minigulov. 2021. P. 1–91. (In Russ.).
6. Seliverstov A. S., Postnov V. V., Lukina V. V. Sistema 5S kak metod povysheniya effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiya [5S system as a method of increasing the efficiency of the enterprise] // *Molodoy uchenyy. Young Scientist*. 2020. No. 42 (332). P. 132–134. (In Russ.).
7. GOST R 56407-2015. Berezhlivoye proizvodstvo. Osnovnyye metody i instrumenty [Lean production. Basic methods and tools]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200120649> (accessed: 13.02.2023). (In Russ.).
8. Protsess standartizatsii raboty v organizatsii: kak i zachem [The process of standardization of work in the organization: how and why]. URL: <http://arprime.ru/avtomatizacia/standartizatsiya-raboty-deyatelnosti-i-protsesov-proizvodstva> (accessed: 18.02.2023). (In Russ.).
9. Vasilyeva S. E., Danilova S. Yu. Metodika vnedreniya instrumenta berezhlivogo proizvodstva 5S [Methodology for implementing the 5S lean manufacturing tool] // *Molodoy uchenyy. Young Scientist*. 2016. No. 13 (117). P. 388–393. (In Russ.).
10. Visualization — tvorcheskiy sposob primeneniya Lean [Visualization is a creative way to apply Lean]. URL: <https://worksection.com/blog/visualization-lean.html> (accessed: 24.02.2023). (In Russ.).
11. Ivanova T. Poka-eko kak metod ustraneniya skrytykh poter' na predpriyatii [Poka-yoke as solution to eliminate hidden losses on enterprise] // *Problemy ekonomiki i menedzhmenta. Problems of Economics and Management*. 2014. No. 7 (35). P. 33–35. (In Russ.).
12. Stepanova K. M., Sushchev A. K. Organizatsiya obsluzhivaniya oborudovaniya po metodu TPM v proizvodstve avtokomponentov [Organization of equipment service by TRM method in manufacturing autocomponents] // *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii. Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2018. No. 1 (16). P. 72–77. (In Russ.).
13. Kanban: kratkoye rukovodstvo [Kanban: a quick guide]. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/upravlenie/vyuchit-kanban/kanban-kratkoe-rukovodstvo> (accessed: 04.03.2023). (In Russ.).
14. Nedbaylyuk B. E., Antonova I. I., Antonov S. A. [et al.]. Metody berezhlivogo proizvodstva v nepreryvnykh

производственных процессах [Methods of frugal production in ceaseless production processes] // Aktual'nyye problemy ekonomiki i prava. *Actual Problems of Economics and Law*. 2011. No. 1 (17). P. 102–110. (In Russ.).

15. Kotlyar E. V., Pushkareva E. M. Sistema upravleniya proyektami KANBAN [KANBAN project management system] // Biznes-obrazovaniye v ekonomike znaniy. *Business Education in the Knowledge Economy*. 2020. No. 1 (15). P. 57–59. (In Russ.).

16. Denisova Ya. V., Petrova A. S., Sopin V. F. Optimizatsiya proizvodstvennogo protsessa putem vnedreniya metodov berezhlivogo proizvodstva [Optimization of the production process through the introduction of lean production methods] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2022. Vol. 84, no. 2. P. 315–323. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-2-315-323. (In Russ.).

17. Vehjder M. Instrumenty berezhlivogo proizvodstva: karmannoye rukovodstvo po praktike primeneniya Lean [Lean tools] / trans. from Engl. Moscow, 2005. P. 86–87. (In Russ.).

18. Roter M. Toyota Kata: liderstvo, menedzhment i razvitiye sotrudnikov dlya dostizheniya vydayushchikhsya rezultatov [Toyota Kata: Managing People for Improvement, Adaptiveness and Superior Results] / trans. from Engl. M. Samsonova. Saint Petersburg, 2014. 304 p. (In Russ.).

19. Andersen B. Biznes-protsessy. Instrumenty sovershenstvovaniya [Business Process. Improvement Toolbox]. Moscow, 2003. 272 p. (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

For citations

Shalnev M. O., Denisova Ya. V. Applying lean manufacturing practices to improve process control in a chemical plant // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 60–67. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-60-67.

Received March 27, 2023.

© **M. O. Shalnev, Ya. V. Denisova**



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.311.212
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-68-76
EDN: ILBPNT

Б. В. ЛУКУТИН
М. М. ПОПОВ

Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет,
г. Томск

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕРТОРНОЙ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЕРИВАЦИОННОГО ТИПА

В данной статье приводится сравнительный анализ технико-экономической эффективности инверторной микроГЭС деривационного типа с накопителем электроэнергии и микроГЭС автобалластного типа. Авторы обосновывают возможность экономии капитальных затрат на строительство инверторной микроГЭС с использованием интеллектуального управления её энергетическим балансом по сравнению с обычными микрогидроэлектростанциями с автобалластной стабилизацией напряжения.

Для оптимального управления генерирующим и преобразующим энергетическим оборудованием автономной системы электроснабжения предложены структура инверторной микроГЭС и алгоритм управления её энергетическим оборудованием по критериям оптимального выбора и стабилизации режима работы гидрогенератора при условии обеспечения электроэнергией потребителя и рационального рабочего режима аккумуляторных накопителей электроэнергии в соответствии с возмущающим воздействием — суточным графиком нагрузки.

Обоснована возможность использования для балластного регулирования гидрогенератора двух типов управляемых балластных нагрузок: зарядного тока аккумуляторного накопителя электроэнергии и традиционного резистивного балласта.

Рассмотрены вопросы выбора рациональной генерируемой мощности инверторного гидрогенератора достаточной для обеспечения с помощью аккумуляторного накопителя электроэнергии потребности нагрузки, что позволяет уменьшать длину напорного трубопровода, установленную мощность гидрогенератора и, соответственно, капитальные затраты по сравнению с микроГЭС автобалластного типа.

Таким образом, статья представляет собой анализ возможностей повышения технико-экономической эффективности инверторной микроГЭС деривационного типа при помощи использования аккумуляторного накопителя электроэнергии в качестве управляемого балласта и предлагаемых интеллектуальных алгоритмов управления её режимами работы.

Статья может быть полезна специалистам, занимающимся созданием и эксплуатацией микрогидроэлектростанций.

Ключевые слова: инверторная микроГЭС деривационного типа, эффективность, аккумуляторные накопители электроэнергии, алгоритм управления, график электрической нагрузки.

Введение. В России по существующей классификации к классу микрогидроэлектростанций (микроГЭС) относят электростанции с установленной мощностью до 100 кВт. МикроГЭС в отличие от крупных гидроэлектростанций имеют ряд положительных особенностей: не требуют больших капитальных вложений на сооружение и эксплуатацию, минимально воздействуют на окружающую среду, не нуждаются в высококвалифицированном обслуживании.

Схемы построения и способы стабилизации генерируемого напряжения современных микроГЭС описаны в литературе [1], где рассмотрены вопросы улучшения качества генерируемой электрической энергии в энергоустановках балластного и инверторного типов.

Для большинства микроГЭС используется деривационная схема, в которой часть речного стока отводится в напорный трубопровод гидротурбины, а затем сбрасывается обратно в реку, не требуя строительства плотин. Мощность гидротурбины с напорным трубопроводом не зависит от водного режима реки, если её минимальный сток превышает количество воды, поступающей в трубопровод. Диаметр трубопровода и перепад высот между его верхней и нижней точкой определяют расчётную мощность станции. Деривационная схема существенно сокращает сроки и затраты на строительство ГЭС, а также минимизирует отрицательное воздействие на окружающую среду.

Стабилизация величины и частоты генерируемого напряжения микроГЭС осуществляется автобалластной системой, обеспечивающей стабилизацию электромеханического баланса гидрогенератора с постоянной энергией рабочего потока воды [2, 3].

Комплектность поставки деривационной микроГЭС с автобалластным регулированием обычно включает: гидротурбина, генератор, блок балластной нагрузки, устройство автоматического регулирования, запорная арматура [4].

В стоимости микроГЭС, кроме комплектной поставки оборудования микроГЭС, следует учитывать стоимость напорного трубопровода, длина которого зависит от необходимого рабочего напора воды и перепада высот русла водотока на участке установки гидроагрегата. Например, для создания рабочего напора 10 метров на участках водотока с разными уклонами русла требуются трубопроводы существенно различающиеся по длине (рис. 1).

В частности, для функционирования гидроагрегата фирмы ИНСЭТ МикроГЭС-10Пр с номинальной мощностью 10 кВт [4] необходим трубопровод диаметром 300 мм, обеспечивающий рабочий напор воды 10 метров. Стоимость 1 метра стальной трубы диаметром 300 мм составляет около 21 тысячи рублей [5]. Стоимость напорного трубопровода различной длины, в соответствии с различными углами наклона участка водотока, показана на рис. 2. Таким образом, при стоимости комплектной поставки микроГЭС 850 тысяч рублей, трубопровод может быть наиболее дорогим элементом микроГЭС.

Снизить затраты на деривационный трубопровод, кроме очевидного способа — выбора подхо-

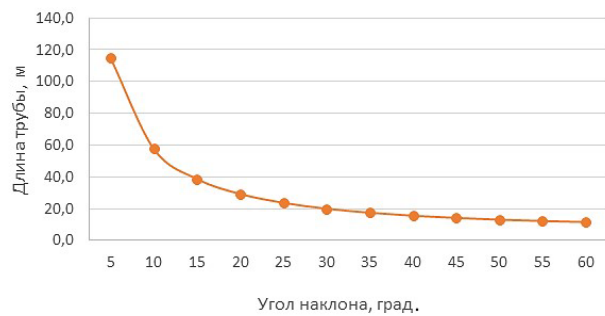


Рис. 1. Зависимость длины напорного трубопровода от угла наклона русла при заданном напоре воды на гидротурбине 10 метров



Рис. 2. Зависимость цены напорного трубопровода от его длины

дящего участка русла, возможно выравниванием графика электропотребления, что позволит снизить необходимую мощность микроГЭС и, соответственно, сократить затраты на генерирующее и гидротехническое оборудование.

Известные достоинства микроГЭС с балластным регулированием не исключают некоторых недостатков, прежде всего ограниченные возможности достижения высокого качества выходного напряжения. Широкое использование в микроГЭС нерегулируемых гидротурбин и электромашинных генераторов с постоянными магнитами или короткозамкнутым ротором определяет наиболее приемлемый вариант стабилизирующей системы — одноканальная токовая балластная система. Такие микроГЭС с пропеллерными гидротурбинами могут обеспечить уровень стабилизации напряжения по величине $\pm 9-12\%$, по частоте $\pm 1,8-5\%$. Такие показатели достигаются при работе на пассивную нагрузку с коэффициентом мощности $0,8-1$ [3].

Кроме того, нестабильность графиков электропотребления снижает коэффициент использования установленной мощности гидрогенератора, которая выбирается по пиковому электропотреблению. Утилизация энергии, рассеиваемой на балластных нагрузках, в целом улучшает энергоэффективность микроГЭС, но вопрос количества и качества электроэнергии на балластных нагрузках существенно ограничивает возможности её полезного использования.

Постановка задачи. Техничко-экономические характеристики микроГЭС могут быть улучшены

за счёт использования в её составе силовых преобразовательных устройств — инверторов и аккумуляторных накопителей электрической энергии с контроллерами заряда-разряда. Инверторная микроГЭС позволяет управлять энергетическим балансом автономного энергетического комплекса, стабилизируя мощность гидрогенерации при неравномерном графике суточного электропотребления. В этом случае обеспечивается стабильная работа гидрогенератора на мощности меньшей пикового электропотребления нагрузкой, что позволяет уменьшить установленную мощность микроГЭС по сравнению со станцией с балластным регулированием, мощность которой выбирается по пиковой нагрузке потребителя. Покрытие пиковой мощности в инверторной микроГЭС осуществляется предварительно накопленной энергией в аккумуляторах за период времени, когда выбранный уровень генерации превышает текущее электропотребление. Снижение установленной мощности инверторной микроГЭС приводит к снижению стоимости её оборудования и повышению коэффициента использования установленной мощности за счёт включения в энергетический баланс обменной мощности аккумуляторного накопителя электроэнергии. Однако для инверторной микроГЭС к стоимости её базового оборудования следует добавить стоимость инвертора и аккумуляторов.

Экономическая целесообразность построения инверторной микроГЭС достигается, если снижение установленной мощности станции за счёт выравнивания мощности генерации и, соответственно, уменьшение её стоимости превысит дополнительные затраты на инвертор и батарею аккумуляторов.

Кроме улучшения технико-экономических характеристик инверторных микроГЭС по сравнению с балластными, снимается проблема качества выходного напряжения, обеспечиваемого современными инверторами.

Вопросы оптимизации структуры и параметров объектов малой энергетики с участием возобновляемых источников актуальны и требуют детальных исследований [6].

Целью настоящей работы является разработка структурной схемы инверторной микроГЭС с аккумуляторным накопителем электроэнергии, выполняющим, кроме аккумуляции электроэнергии, функции управляемого балласта и алгоритма функционирования автономной системы электроснабжения на её основе, а также оценка экономической эффективности предложенной инверторной микроГЭС по сравнению с микроГЭС автобалластного типа.

Формирование интеллектуального алгоритма функционирования системы электроснабжения на основе микроГЭС со статическим преобразователем частоты и электрохимическими накопителем электроэнергии основывается на уравнении баланса мощностей:

$$P_n = P_{гр} - P_o - P_s + P_p, \quad (1)$$

где P_n , $P_{гр}$, P_o , P_s , P_p — это соответственно мощность нагрузки, мощность гидротурбины микроГЭС, мощность балластной нагрузки, мощности заряда или разряда аккумуляторной батареи. Следует заметить, что генерируемая гидротурбиной мощность поддерживается на оптимальном уровне с помощью обменной мощности аккумуляторов и балласта. Для этого аккумуляторы должны запасать электроэнер-

гию гидрогенератора в часы, когда она превышает электропотребление нагрузки, и отдавать её потребителю в часы пиковой нагрузки, дополняя неизменный уровень генерации (и потребления) до необходимого максимума.

Оптимизировать энергетический баланс (1) целесообразно с помощью компьютерного моделирования изменяющихся и взаимосвязанных, в соответствии с текущей нагрузкой, энергетических характеристик компонентов автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС.

Реальные графики электропотребления носят стохастический характер, что определяет необходимость использования общепринятых типовых суточных графиков для различных типов потребителей, предполагающих дискретное почасовое изменение потребляемой мощности. Для типичной нагрузки — изолированного посёлка принимаем типовой график электропотребления сельского дома [7]. Соответственно, изменения энергетического баланса системы электроснабжения в течение характерных суток представляются временной последовательностью статических режимов с интервалом дискретизации 1 час. Статический характер электропотребления определяет использование статических моделей энергетических характеристик компонентов инверторной микроГЭС.

Мощность, развиваемая гидротурбиной, определяется из выражения:

$$P_T = \gamma \frac{Q \cdot H}{\Omega} \eta_T \quad (2)$$

где γ — вес единицы объема воды; Q — расход воды; H — рабочий напор; Ω — угловая частота вращения; η_T — полный КПД турбины.

Развиваемая мощность и частота вращения гидротурбины определяют расчетную мощность генератора, его массу, габариты и стоимость. В общем случае эти параметры связаны соотношением:

$$\frac{D^2 I_\delta \Omega}{P} = \sigma \frac{1}{A \cdot B_\delta}, \quad (3)$$

где D — внутренний диаметр статора электрической машины; I_δ — расчетная длина воздушного зазора; P — расчетная полная мощность; Ω — частота вращения; A — линейная нагрузка; B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре; σ — коэффициент пропорциональности [8]. Выходная электрическая мощность микроГЭС отличается от мощности гидротурбины на величину КПД гидротурбины

$$P_{гр} = \gamma \frac{Q \cdot H}{\Omega} \eta_T \eta_r. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае гидротурбина инверторной микроГЭС работает в одном статическом режиме в течение суток независимо от графика нагрузки благодаря напорному трубопроводу и стабилизации генерируемой мощности балластными нагрузками: системой аккумуляции электроэнергии и резистивным балластом. При указанных условиях для исследования энергетических балансов автономной системы электроснабжения возможно полагать постоянными параметры в уравнениях (1–4) и использовать энергетические характеристики промышленного образца микроГЭС, например, фирмы ИНСЭТ. Такой под-

ход позволяет достаточно просто оценивать взаимосвязь между параметрами рабочего потока воды гидротурбины: рабочего напора H , расхода воды Q и электрической мощностью гидрогенератора. Следует отметить, что данные производителя получены экспериментальным путём, что определяет достоверность получаемых на их основе результатов исследований.

Для построения системы накопления электроэнергии целесообразно использование литий-ионных аккумуляторов, имеющих на сегодня лучшие технико-экономические характеристики [9]. Для расчёта изменений запаса электроэнергии в аккумуляторах необходимо вычислять интеграл обменной мощности по времени: $\int_0^{\infty} P dt = dW$. В нашем случае изменение заряда аккумуляторов происходит каждый час суток на величину доступной энергии, определяемой как разность между стабилизируемым уровнем генерации и величиной потребления в соответствии с суточным графиком нагрузки. Ограничением по мощности заряда служат эксплуатационные рекомендации по величине длительного зарядного тока, которые определяют максимальный зарядный ток как $3C$, где C — ёмкость аккумулятора в Ампер-часах [10]. Другим ограничением является глубина разряда, определяемая типом аккумуляторов. Для литий-феррумных аккумуляторов она ограничивается величиной 70–80 % относительно номинального значения ёмкости [11].

Структурная схема предлагаемой инверторной микроГЭС приведена на рис. 3. Данная схема позволяет выделить основные функциональные элементы микроГЭС и сформулировать условия для их взаимодействия.

Электромашинный генератор Γ с нерегулируемым магнитным потоком возбуждения приводится во вращение гидротурбиной T . Электроэнергия переменного тока генератора выпрямляется с помощью преобразователя AC/DC и вновь инвертируется в электроэнергию переменного тока со стабильными параметрами преобразователем DC/AC. Таким образом нагрузка H обеспечивается качественной электроэнергией, соответствующей выходным параметрам преобразователя.

Энергетический баланс автономной системы электроснабжения с микрогидроэлектростанцией обеспечивается балластной системой регулирования с двумя видами балластных нагрузок: аккумуляторными батареями и балластными резисторами. Соответственно, накапливая доступную электроэнергию в электрохимических аккумуляторах, представляется возможность её использования в часы пикового электропотребления в отличие от балластных резисторов, преобразующих электроэнергию в конечный вид энергии — тепло.

Аккумуляторная батарея связана с шиной постоянного тока через двунаправленный DC/DC преобразователь. Управление режимами работы DC/DC преобразователя аккумуляторной батареи и контроллера балласта КБ осуществляется системой управления СУ в соответствии с данными датчика мощности нагрузки P_n по отношению к уставке мощности генератора, подлежащей стабилизации, а также состояния аккумуляторов и учёта ограничений на величину зарядного тока аккумуляторов.

Работа системы электроснабжения в установленном режиме позволяет стабилизировать потребление энергии от турбогенератора на выбранном уровне: в случае превышения потребления энергии происходит компенсация за счет накопленной энер-

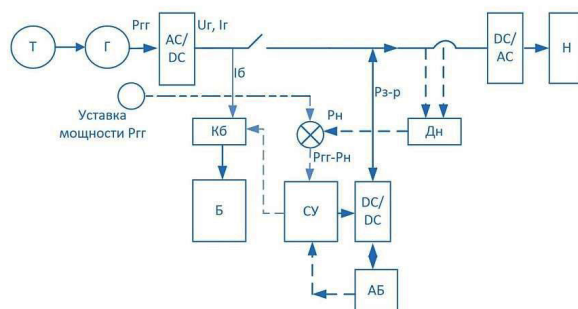


Рис. 3. Структурная схема инверторной микроГЭС

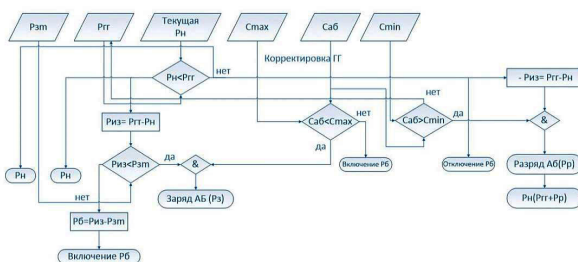


Рис. 4. Логическая структура алгоритма функционирования инверторной микроГЭС

гии в аккумуляторной батарее, в случае недогрузки турбогенератора происходит заряд аккумуляторной батареи и, при необходимости, включение в работу балластной нагрузки. Обеспечение постоянства развиваемой мощности и частоты вращения гидрогенератора позволяет использовать общепромышленные генераторы, предназначенные для работы с постоянными оборотами, ограничивает диапазон изменения выходного напряжения генератора, что облегчает построение выпрямительно-инверторной части гидроэнергетического источника электропитания.

Ключ K в нормальном режиме замкнут. В разомкнутом состоянии ключа имеется возможность некоторое время питать нагрузку от батареи аккумуляторов АБ.

Алгоритм расчётов рабочих режимов системы электропитания представлен на рис. 4. Исходными данными для алгоритма являются принятая мощность стабилизации гидрогенератора $P_{пр}$ и текущая почасовая мощность электрических нагрузок на начальный момент времени в соответствии с суточным графиком электропотребления P_n . Начальный момент времени может выбираться произвольно. Исходное состояние батареи аккумуляторов определяется величиной ёмкости $C_{аб}$, которая может задаваться произвольно. Параметры, ограничивающие режимы работы аккумуляторной батареи: максимальная мощность заряда $P_{зм}$, максимальный $S_{макс}$ и минимальный $C_{мин}$ уровень заряда в соответствии с рекомендациями для конкретных типов аккумуляторов.

К целевым функциям алгоритма относятся: определение минимально возможного уровня стабилизации мощности гидрогенератора, обеспечивающего гарантированное обеспечение электроэнергией нагрузки в соответствии с суточным графиком; формирование рациональных режимов функционирования системы аккумулирования электроэнергии с учётом её номинальной ёмкости; обеспечение приоритетного использования, в качестве балласт-

ной нагрузки гидрогенератора, зарядной мощности аккумуляторов; определение временных интервалов для включения резистивного балласта необходимой мощности.

Возмущающим воздействием, определяющим управляющие воздействия алгоритма, является суточный график электропотребления объекта электрификации.

Управляющими параметрами алгоритма являются управляемые балласты электрохимического и резистивного типов и корректируемая уставка уровня стабилизации мощности генерации гидрогенератора.

Различные цели управляющего алгоритма, учёт внутреннего состояния элементов регулируемой системы, а также возможностей принятия неоднозначных управляющих воздействий определяют представленный алгоритм как интеллектуальный.

Режимы функционирования алгоритма определяются соотношением мощности стабилизации гидрогенератора и текущей, для рассматриваемого часа суток, мощности нагрузки, а также состоянием заряда аккумуляторов.

Если мощность нагрузки меньше, чем уставка гидрогенератора: $P_n < P_{гр}$, то необходимая мощность поступает в нагрузку, а разница мощностей $P_{из}$, если она не превышает предельную мощность заряда аккумуляторов $P_{из} < P_{зм}$ и состояние аккумуляторов $Sаб < Sмах$ позволяет принять зарядную мощность, направляется на заряд батареи аккумуляторов. Зарядная мощность аккумуляторов также выполняет роль балластной нагрузки, стабилизируя режим работы гидрогенератора на уровне мощности $P_{гр} = P_n + P_з$. Если аккумуляторы не в состоянии принять доступную мощность генератора, то часть её, превышающая зарядную, отправляется в тепловой балласт $P_{от}$, обеспечивающий стабилизацию тормозного момента генератора и, соответственно, частоты вращения и генерируемой мощности гидроагрегата: $P_{гр} = P_n + P_з + P_{от}$.

Если текущая мощность нагрузки превышает мощность стабилизации режима гидрогенератора, то генератор продолжает работать на мощности стабилизации $P_{гр}$, балласт отключается (если он был в работе), а DC/DC преобразователь аккумуляторной батареи, если её заряд больше минимально допустимого, переводит её в режим разряда, дополняя стабилизируемую мощность гидрогенератора $P_{гр}$ разрядной мощностью аккумуляторов P_p до необходимой для покрытия пиковой нагрузки P_n . Режим работы гидрогенератора при этом остаётся стабильным, определяемым мощностью генератора $P_{гр} = P_n - P_p$.

Если уровень заряда аккумуляторов снижается до уровня меньше допустимого, то производится корректировка в сторону повышения генерируемой мощности гидрогенератора. Величина корректировки оценивается в течение следующего суточного цикла работы инверторной микроГЭС.

Последовательный анализ состояния инверторной микроГЭС в соответствии с суточным графиком нагрузки позволяет установить необходимый уровень мощности стабилизации гидрогенератора и оптимизировать состав и режимы работы аккумуляторного накопителя с функцией электрохимического балласта.

Оценка эффективности проектов электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии является сложным и многофакторным процессом, требующим учета энергетического потенциала природного ресурса в рассматриваемом месте раз-

Технические характеристики микроГЭС

Модель	МикроГЭС-10ПР	
Напор, м	2 – 4,5	4,5 – 10
Расход воды, м ³ /с	0,07 – 0,14	0,095 – 0,2
Вырабатываемая мощность, кВт	до 4,0	до 10
Диаметр рабочего колеса, мм	250	
Диаметр подводящего трубопровода, мм	300	

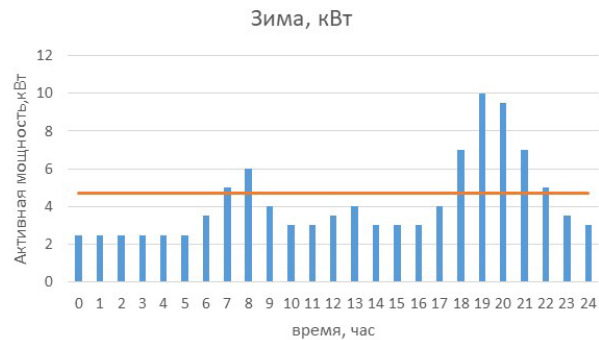


Рис. 5. Типовой график электрических нагрузок сельского дома и среднесуточное электропотребление

мещения, графиков электрических нагрузок автономных потребителей, установленных мощностей генерирующего, накопительного и преобразующего оборудования, экономических условий для реализации проекта электроснабжения.

Решение поставленных задач целесообразно путём компьютерного моделирования суточных энергетических балансов автономной системы электроснабжения на базе микроГЭС с почасовой дискретизацией процессов энергопреобразования. На рассматриваемом этапе исследования проводятся без учёта потерь электроэнергии при её преобразованиях и транспортировке, а также полагая стабильную мощностную характеристику гидротурбины с напорным трубопроводом.

Результаты численных экспериментов. В качестве примера для проведения численного эксперимента выбрана микроГЭС фирмы ИНСЭТ: МикроГЭС — 10ПР номинальной мощностью 10 кВт при рабочем напоре 10 м [4]. Технические характеристики микроГЭС приведены в табл. 1. Режим работы автономной микроГЭС определяется графиком нагрузок объекта электрификации. Типовой суточный график сельских бытовых потребителей в именованных единицах для рассматриваемого примера приведён на рис. 5. Пиковая мощность электропотребления принята 10 кВт, среднесуточная мощность — 4,69 кВт.

Учитывая общепринятое представление типовых суточных графиков электропотребления дискретными значениями с интервалом дискретизации 1 час [7] и пренебрежимо малое время отклика системы накопления электроэнергии 0,005–0,02 секунды [12], уравнения для расчёта суточных изменений энергии в аккумуляторном накопителе приобретают вид (5, 6).

Для выбранного уровня мощности генерации микроГЭС на уровне $P_{гр} = 47\%$ от максимума пи-



Рис. 6. Диаграмма энергетического баланса автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС

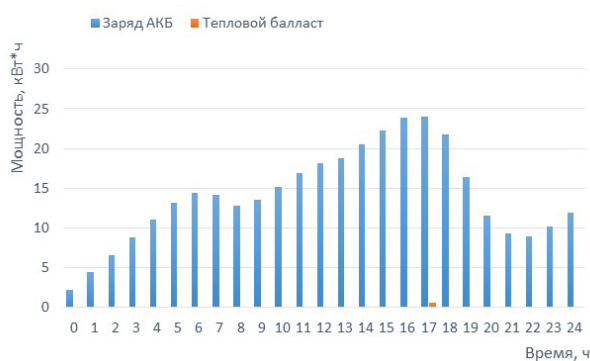


Рис. 7. График изменения энергии АКБ и ТЭН

ковой нагрузки 10 кВт энергия заряда и разряда аккумуляторов определяется по выражениям:

$$W_s = \sum_{i=0}^6 (P_{\text{пр}} - P_{\text{Ги}}) t_i + \sum_{i=9}^{17} (P_{\text{пр}} - P_{\text{Ги}}) t_i + \sum_{i=23}^{24} (P_{\text{пр}} - P_{\text{Ги}}) t_i, \quad (5)$$

$$W_p = \sum_{i=7}^8 (P_{\text{пр}} - P_{\text{Ги}}) t_i + \sum_{i=18}^{22} (P_{\text{пр}} - P_{\text{Ги}}) t_i, \quad (6)$$

$$W_s \geq W_p.$$

Результаты моделирования в графическом виде приведены на рис. 6. На рисунке приведены почасовые изменения суточного энергетического баланса автономной системы электроснабжения с инверторной микроГЭС, включающего мощности нагрузки, мощности заряда и разряда аккумуляторных батарей, мощность теплового резистивного балласта и мощность гидрогенератора. За базовую микроГЭС принят промышленный образец МикроГЭС-10Пр фирмы ИНСЭТ. Минимальный уровень стабилизации генерируемой мощности гидрогенератора определен в 47 % от вечернего максимума электропотребления, что немного превышает среднесуточную нагрузку микроГЭС. Как следует из рис. 6, такой уровень стабилизации мощности гидрогенератора, при максимальной ёмкости аккумуляторов накопителя 24 кВт·ч, полностью обеспечивает энергетические потребности нагрузки и рациональные режимы работы аккумуляторов. Использование резистивного балласта в рассматриваемых условиях не требуется. При других условиях — например, при повышении мощности стабилизации (при той же ёмкости аккумуляторов) потребуются включение в энергетический баланс автономной системы электроснабжения резистивного балласта в определённые часы суток. Пример такого режима работы приведён на рис. 7, где резистивный балласт необходимой мощности включается с 17 до

18 часов. Там же представлены почасовые суточные изменения величины запаса энергии аккумуляторов, начиная с нуля часов и исходного запаса электроэнергии 2 кВт·ч до следующего суточного цикла с новым исходным уровнем заряда 12 кВт·ч. Очевидно, следующий цикл работы аккумуляторного накопителя, при неизменном графике электропотребления, будет установившимся для последующих циклов. Минимальный остаточный заряд аккумуляторов при этом не снижается менее чем до 30 % относительно номинального.

Экономические преимущества предлагаемой микроГЭС могут оцениваться сравнением её капитальных затрат с базовой станцией. Стоимость оборудования МикроГЭС-10Пр составляет 850 тыс. рублей [4], а стоимость стального напорного трубопровода диаметром 300 мм и длиной 40 метров для обеспечения напора 10 м для местности с уклоном русла водотока в 15 градусов равна 786 тыс. рублей [5]. Если в состав оборудования микроГЭС включить инвертор с накопителем электроэнергии, то можно использовать данную микроГЭС, ориентируясь на среднесуточную мощность электропотребления в 4,7 кВт, что позволит уменьшить напор до 5 метров и сократить длину напорного трубопровода до 20 метров. На сэкономленную часть средств возможно приобретение аккумуляторных батарей и инвертора.

В качестве силового модуля выбран однофазный инвертор «Delta ES RT» [9] мощностью 4,5 кВт и стоимостью 62 000 рублей. Для формирования трёхфазной сети нагрузки необходимы 3 инвертора суммарной стоимостью 186 000 рублей.

При выборе аккумуляторов для накопительного устройства необходимо учитывать возможность их быстрой зарядки с использованием больших токов. Кроме того, аккумуляторы должны иметь высокую стойкость в циклическом режиме с учётом ограничений на глубину разряда.

Этим требованиям в значительной степени удовлетворяют литий-феррумные аккумуляторы [13]. Уровень разряда для литий-железо-фосфатных (LiFePO4) аккумуляторов может варьироваться в зависимости от производителя и конкретной модели аккумулятора. Однако, как правило, рекомендуемый минимальный уровень разряда для LiFePO4 аккумуляторов ограничивается примерно 30 % от номинальной ёмкости аккумулятора [11]. При этих условиях ёмкость аккумуляторов составляет 24 кВт·ч (рис. 7).

Для системы накопления электроэнергии в инверторной микроГЭС были выбраны аккумуляторы компании «Sunways» [11] ёмкостью 100 А·ч и напряжением 3,2 В. В целях увеличения ёмкости использовано соединение 10 ячеек параллельно, а для увеличения напряжения — 8 ячеек последовательно, тем самым увеличив батарейный блок до 80 единиц. Общая стоимость данного блока составила 478 800 рублей. Сравнив затраты на базовую микроГЭС автобалластного типа с напорным трубопроводом и затраты на предложенную микроГЭС инверторного типа, отметим экономию капитальных затрат на предлагаемую инверторную микрогидроэлектростанцию в рассмотренном варианте реализации — около 15,4 %.

Закключение. Экономия получена за счёт сокращения длины напорного трубопровода, что становится возможным, при неизменных параметрах электропотребления, с помощью выравнивания графика генерации гидрогенератора и исполь-

зовании аккумуляторного накопителя электроэнергии. Предложенная структура инверторной микроГЭС, объединённая интеллектуальным алгоритмом управления генерирующим, преобразующим и аккумулирующим оборудованием, позволяет автономной системе электроснабжения адаптироваться к изменениям графика электропотребления путём варьирования уровня стабилизации генерируемой мощности и глубины разряда аккумуляторов.

Система аккумулирования электроэнергии позволяет существенно повысить КПД преобразования энергии первичного энергоисточника — потока воды в электроэнергию, поступающую к потребителю.

Используя режим источника бесперебойного питания, система может снабжать потребителей электроэнергией при останове гидротурбины за счёт запасённой энергии аккумуляторных батарей.

Библиографический список

1. Малая и микрогидроэнергетика. URL: <https://www.microhydro.ru/> (дата обращения 20.01.2022).
2. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013. Vol. 28 (2). P. 452–459. DOI: 10.1109/TEC.2013.2247605.
3. Лукутин Б. В., Обухов С. Г., Шандарова Е. Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций: моногр. Томск: STT, 2001. 120 с.
4. Микрогидроэлектростанция мощностью 10 кВт. URL: <https://inset.ru/produkcija/mges-10pr/> (дата обращения: 22.01.2022).
5. Металлопрокат, металл и сталь. URL: <https://metallas.ru> (дата обращения: 20.01.2022).
6. Обухов С. Г., Плотников И. А., Сарсикеев Е. Ж. Буферная система накопления электроэнергии для возобновляемой энергетики // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 9 (113). С. 137–141.
7. Типовые суточные графики. URL: <https://www.online-electric.ru/dbase/graph24.php> (дата обращения: 20.01.2022).
8. Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. Москва: Энергия, 1980. 496 с.
9. Промышленные источники бесперебойного питания. URL: <https://www.bespereboynik.ru> (дата обращения: 08.03.2022).
10. Popov M., Maniv O. Simulation of an autonomous power supply system based on lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 141. DOI: 10.1051/mateconf/201714101060.
11. Литиевые аккумуляторные батареи. URL: <https://s-ways.ru/> (дата обращения: 08.03.2022).
12. Dybko M. A., Kuchak S. V., Bachurin P. A., Brovanov S. V., Kharitonov S. A. Load leveling for a diesel generator using an energy storage and instantaneous power theory // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2018. P. 567–573. DOI: 10.1109/EDM.2018.8434936.
13. Hassoun J., Bonaccorso F., Agostini M. [et al.]. An Advanced Lithium-Ion Battery Based on a Graphene Anode and a Lithium Iron Phosphate Cathode // ACS Publications. 2014. Vol. 14. P. 4901–4906. DOI: [dx.doi.org/10.1021/nl502429m](https://doi.org/10.1021/nl502429m).

ЛУКУТИН Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ), г. Томск.

SPIN-код: 5558-7038

AuthorID (РИНЦ): 113093

ORCID: 0000-0002-5201-6886

AuthorID (SCOPUS): 56617283300

Адрес для переписки: lukutin48@mail.ru

ПОПОВ Михаил Михайлович, старший преподаватель Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ТПУ, г. Томск.

SPIN-код: 6156-9529

AuthorID (РИНЦ): 1029978

AuthorID (SCOPUS): 57201876269

Адрес для переписки: mix_mix13@tpu.ru

Для цитирования

Лукутин Б. В., Попов М. М. Повышение технико-экономической эффективности инверторной микрогидроэлектростанции деривационного типа // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 68–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-68-76.

Статья поступила в редакцию 20.03.2023 г.

© Б. В. Лукутин, М. М. Попов

IMPROVING THE TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF A DERIVATION-TYPE INVERTER OF MICRO HYDRO POWER PLANT

This article presents a comparative analysis of the technical and economic efficiency of a derivation-type inverter micro hydro power plant with an energy storage system and an auto-ballasted micro hydro power plant. The authors justify the possibility of saving financial resources by reducing the length of the derivation-type micro hydro power plant's pressure pipeline with an energy storage system. To optimally control the generating and transforming equipment of an autonomous power supply system, a control algorithm is proposed based on criteria for limiting the range of hydrogenerator rotational frequencies and ensuring the rational operating mode of the electric energy storage batteries according to the load's power consumption schedule.

The possibility of using the charging current of the electric energy storage battery in combination with traditional resistive ballast to create a braking control moment for the hydrogenerator is justified.

The article considers issues related to regulating the rational generated power of the hydrogenerator by aligning the power consumption schedule using electric energy storage systems, which allows reducing the length of the pressure pipeline and, consequently, capital costs.

Thus, the article represents a comprehensive analysis of the technical and economic efficiency and optimal control of a derivation-type inverter micro hydro power plant with an energy storage system, which can be used in the design and operation of similar power supply systems.

Keywords: derivation-type micro hydro power plant, efficiency, energy storage systems, control algorithm, inverter, load curve.

References

1. Malaya i mikrohidroenergetika [Small-scale energy]. URL: <https://www.microhydro.ru/> (accessed: 20.01.2022). (In Russ.).
2. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013. Vol. 28 (2). P. 452–459. DOI: 10.1109/TEC.2013.2247605. (In Engl.).
3. Lukutin B. V., Obukhov S. G., Shandarova E. B. Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrohidroelektrostantsiy [Autonomous power supply from micro-hydropower plants]. Tomsk, 2001. 120 p. (In Russ.).
4. Mikrohidroelektrostantsiya moshchnost'yu 10 kW [Micro-hydro power plant with 10 kW]. URL: <https://inset.ru/produkcija/mges-10pr/> (accessed: 22.01.2022). (In Russ.).
5. Metalloprokat, metal i stal' [Rolled metal, metal and steel]. URL: <https://metallas.ru> (accessed: 20.01.2022). (In Russ.).
6. Obukhov S. G., Plotnikov I. A., Sarsikeev E. Zh. Buffernaya sistema nakopleniya elektroenergii dlya vozobnovlyaemoi energetiki [The buffer system of electric energy storage for renewable energy] // Alternativnaya energetika i ekologiya. *Alternative Energy and Ecology*. 2012. No. 9 (113). P. 137–141. (In Russ.).
7. Tipovyye sutochnyye grafiki [Typical daily charts]. URL: <https://www.online-electric.ru/dbase/graph24.php> (accessed: 20.01.2022). (In Russ.).

8. Proyektirovaniye elektricheskikh mashin [Design of electrical machines] / Ed. by I. P. Kopylova. Moscow: Energiya, 1980. 496 p. (In Russ.).
9. Promyshlennyye istochniki bespereboynogo pitaniya [Industrial uninterruptible power supplies]. URL: <https://www.bespereboynik.ru> (accessed: 08.03.2022). (In Russ.).
10. Popov M., Maniv O. Simulation of an autonomous power supply system based on lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 141. DOI: 10.1051/mateconf/201714101060. (In Engl.).
11. Litiyevyye akkumulyatornyye batarei [Lithium batteries]. URL: <https://s-ways.ru/> (accessed: 08.03.2022). (In Russ.).
12. Dybko M. A., Kuchak S. V., Bachurin P. A., Brovanov S. V., Kharitonov S. A. Load leveling for a diesel generator using an energy storage and instantaneous power theory // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2018. P. 567–573. DOI: 10.1109/EDM.2018.8434936. (In Engl.).
13. Hassoun J., Bonaccorso F., Agostini M. [et al.]. An Advanced Lithium-Ion Battery Based on a Graphene Anode and a Lithium Iron Phosphate Cathode // ACS Publications. 2014. Vol. 14. P. 4901–4906. DOI: [dx.doi.org/10.1021/nl502429m](https://doi.org/10.1021/nl502429m). (In Engl.).

LUKUTIN Boris Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Electric Power Engineering and

Electrical Engineering Department, School of Energy and Power Engineering, Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk.

SPIN-code: 5558-7038

AuthorID (RSCI): 113093

ORCID: 0000-0002-5201-6886

AuthorID (SCOPUS): 56617283300

Correspondence address: lukutin48@mail.ru

POPOV Mikhail Mikhailovich, Senior Lecturer of Electric Power Engineering and Electrical Engineering Department, School of Energy and Power Engineering, TPU, Tomsk.

SPIN-code: 6156-9529

AuthorID (RSCI): 1029978

AuthorID (SCOPUS): 57201876269

Correspondence address: mix_mix13@tpu.ru

For citations

Lukutin B. V., Popov M. M. Improving the technical and economic efficiency of a derivation-type inverter of micro hydro power plant // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 68–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-68-76.

Received March 20, 2023.

© **B. V. Lukutin, M. M. Popov**

СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Повышение надежности и увеличение эксплуатационного ресурса электро-технического оборудования электроподвижного состава является одним из восьми направлений научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги», описанных в целевой программе «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации.

Решение проблемы повышения эксплуатационной надежности связано с комплексными мероприятиями, включающими в себя широкий круг вопросов, направленных на обеспечение устойчивой работы подвижного состава и его систем.

Надежная работа электрических машин, которая зависит от качества ремонта, оказывает существенное влияние на эксплуатационную надежность электроподвижного состава.

Ключевые слова: асинхронные электрические машины, метод взаимной нагрузки, частотный преобразователь, синус-фильтр, приемо-сдаточные испытания, испытательные стенды.

Технологический процесс проведения испытаний асинхронных электрических машин (далее по тексту АЭМ), реализуемый каждым испытательным стендом, должен соответствовать ГОСТ 2582-2013, ГОСТ 11828-86, ГОСТ Р МЭК 60034-14-2008, программа и методика (ПМ) приёмо-сдаточных испытаний (ПСИ) и эксплуатационных документов на асинхронные электрические машины.

Объём проверок приемо-сдаточных испытаний (далее по тексту ПСИ) должен соответствовать программе приемо-сдаточных испытаний, приведенной в таблице Б.2 ГОСТ 2582-2013.

Проверки должны выполняться в указанной ниже последовательности и следующих технологических операциях:

1. Установка электродвигателя на участок подготовки тяговых двигателей.
2. Внешний осмотр.
3. Посадка на валы полумуфт для соединения машин и проведения испытаний методом взаимной нагрузки.
4. Установка механической части на плиту стенда ПСИ в соответствии с типом проверяемой электрической машины.
5. Установка электрических машин на механическую часть стенда ПСИ, подключение патрубков

охлаждающего воздуха при независимой системе вентиляции и сочленение валов электродвигателей.

6. Подключение силовых и измерительных проводов стенда ПСИ к электродвигателям.

7. Измерение сопротивления изоляции обмоток статора машин относительно корпуса в холодном состоянии согласно ГОСТ 11828-86.

Измерение сопротивления изоляции обмоток выполняется на практически холодных двигателях (температура любой части двигателя не должна отличаться от температуры окружающей среды более чем на $\pm 3^\circ\text{C}$). Контроль температуры обмоток осуществляется при помощи преобразователя термоэлектрического. По окончании измерения происходит автоматический разряд сопротивления изоляции обмотки статора путём её электрического соединения с заземлённым корпусом двигателя.

8. Измерение сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии методом амперметра-вольтметра по ГОСТ 11828-86.

При измерении сопротивления обмоток постоянному току контролируется температура обмоток при помощи преобразователя термоэлектрического, измеренное значение которой не должно отличаться от температуры окружающей среды более чем на $\pm 3^\circ\text{C}$.

Сопротивление между каждой парой выводов двигателя должно определяться при трёх значениях тока согласно ГОСТ 11828-86. Длительность протекания тока не более 1 мин.

В ходе проведения измерения производится замер сопротивления между каждой парой обмоток и приводится к температуре 20 °С.

9. Проверка на нагревание в течение часа по ГОСТ 2582-2013, ГОСТ 11828-86 и ГОСТ 7217-87 методом взаимной нагрузки.

Двигатели испытывают по методу взаимной нагрузки. Один из испытуемых двигателей работает в двигательном режиме, а другой — в генераторном.

Испытания на нагревание начинают только с практически холодного состояния двигателей (при нормальных климатических условиях — 25 ± 10 °С).

Температуру охлаждающего воздуха контролировать в течение всего часового режима через каждые 15 мин. с помощью преобразователя термoeлектрического, устанавливаемого во входном патрубке охлаждающего воздуха. Сопротивление обмотки статора определяют одновременно для двух электродвигателей с помощью преобразователей, используемых при проверке, по окончании испытания на нагревание после их остановки и отключения вентиляции.

За значение сопротивления обмотки статора принимают значение, полученное экстраполяцией сопротивления на момент отключения двигателей.

Температуры подшипников определяются после окончания проверки температуры обмотки статора, преобразователя термоэлектрического на крышках подшипников.

10. Проверка при повышенной частоте вращения в соответствии с ГОСТ 2582-2013, нагретых до рабочей температуры при работе их в режиме холостого хода. Оборудование должно позволять выполнять проведение проверки как поочередно, так и вместе на двух двигателях. Частота вращения должна плавно повышаться до требуемого значения, выдерживаться в течение времени 120 с., после чего плавно снижаться до полной остановки.

11. Проверка электрической прочности межвитковой изоляции обмотки статора нагретых до рабочего состояния двигателей в соответствии с ГОСТ 2582-2013 и ГОСТ Р 52776-2007 (МЭК 60034-1-2004). Оборудование должно позволять выполнять проведение проверки поочередно, без перепоключения силовых и измерительных цепей. Испытания проводятся в автоматическом режиме с плавным повышением линейного напряжения и частоты выдержкой в течение 5 минут.

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если во время испытания не происходит пробоя изоляции.

12. Определение тока и потерь холостого хода при номинальной частоте тока статора и номинальном напряжении в соответствии с ГОСТ 7217-87. Проверка проводится на холостом ходу при нагретом состоянии подшипниковых узлов. При испытании осуществляется измерение линейных напряжений и токов по каждой фазе обмотки статора, потребляемая мощность.

13. Измерение сопротивления изоляции обмоток статора относительно корпуса в нагретом состоянии согласно ГОСТ 11828-86 для каждого электродвигателя.

14. Отключение машин от схемы стенда ПСИ.

15. Испытание электрической прочности изоляции обмоток статора относительно корпуса со-

гласно ГОСТ 11828-86 при неподвижном состоянии нагретых двигателей практически синусоидальным напряжением.

Известные схемы стендов [1–6] для испытаний асинхронных двигателей, реализующие возврат электрической энергии, вырабатываемой нагрузочным генератором в сеть, используют помимо испытуемых дополнительные электрические машины, либо только один частотный преобразователь.

Недостатком таких схем испытательных стендов является отсутствие возможности проведения полного цикла приемо-сдаточных испытаний, включающих в себя следующие проверки:

— испытание на нагревание в часовом режиме, при номинальной нагрузке;

— испытание при повышенной частоте вращения. Каждый двигатель испытывается отдельно. Двигатель должен быть отсоединен от промежуточной опоры. Для некоторых двигателей возможно испытания 2-х двигателей одновременно;

— испытание электрической прочности междувитковой изоляции. Каждый двигатель испытывается индивидуально;

— измерение уровня вибрации. Каждый двигатель испытывается индивидуально.

Еще одним из недостатков таких схем является отсутствие компенсации колебаний напряжения питающей сети.

Целью данной работы является повышение эффективности применения испытательных стендов при проведении испытаний асинхронных электрических машин за счет применения схемного решения, описанного далее (в настоящее время подана заявка на полезную модель).

Предлагаемое схемное решение испытательного стенда позволит обеспечить проведение полного цикла испытаний, включая испытания электрической прочности междувитковой изоляции обмоток (далее по тексту ИМВЗ) согласно пунктам 5.6 и 8.17 ГОСТ 2582-2013, испытание на нагревание при номинальных параметрах и компенсация колебаний напряжения питающей сети [7].

Изоляция между смежными витками обмоток должна выдерживать в течение 300 секунд приложенное повышенное напряжение к выводам электрической машины при ее работе на холостом ходу. Для асинхронных электрических машин предусмотрено увеличение напряжения на 50 % сверх номинального (наибольшего, если несколько номинальных значений).

Допускается повышение частоты вращения испытуемой асинхронной электрической машины, одновременно с увеличением напряжения, но не более чем на 75 % для испытания АЭМ при повышенной частоте вращения.

Данная цель может быть достигнута за счет применения в схеме двух частотных преобразователей, отличающихся по мощности с возможностью передачи электрической энергии не только от промышленной сети к асинхронному двигателю, но и от одного частотного преобразователя к другому по звену постоянного тока либо через питающую сеть. Двух согласующих трансформаторов, имеющих секционированные вторичные обмотки (мощности согласующих трансформаторов соответствуют мощностям частотных преобразователей) в отличие от прототипа, испытуемая машина подключена к преобразователю частоты через согласующий трансформатор. Нагрузкой является асинхронная электрическая машина, работающая в режиме

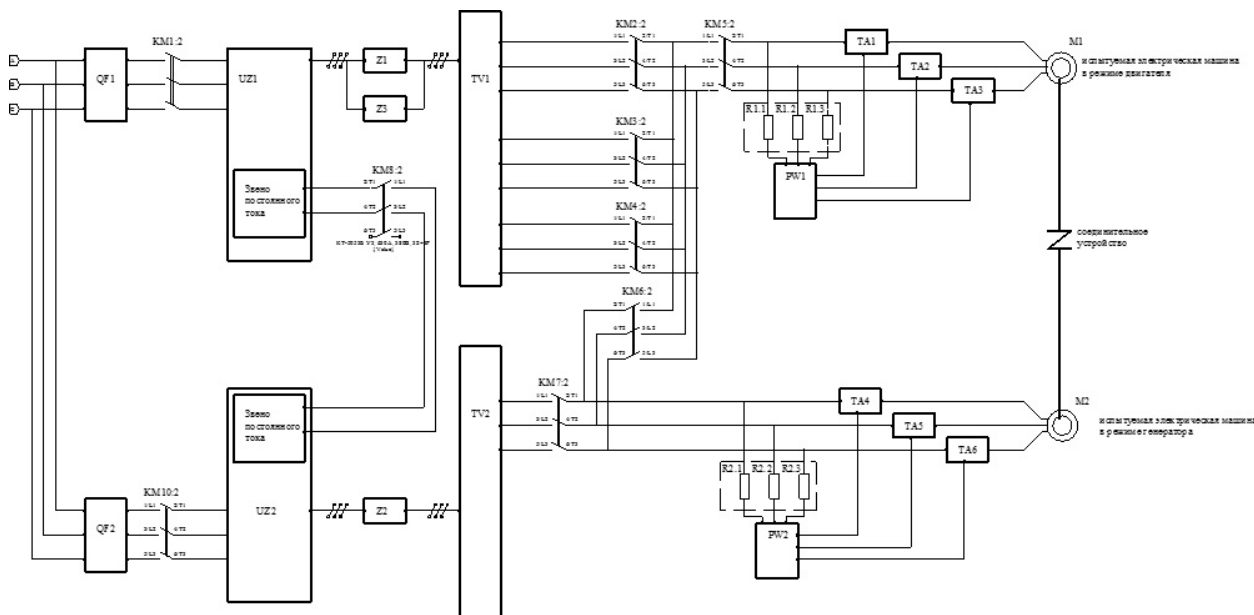


Рис. 1. Структурная схема стенда

генератора, также подключенная к частотному преобразователю через согласующий трансформатор, мощность которого превышает номинальную мощность асинхронной электрической машины на 10 %.

Принципиальная схема предлагаемого стенда показана на рис. 1.

Схема состоит из преобразователей частоты UZ1 и UZ2, согласующих трансформаторов TV1, TV2, синус-фильтров Z1 – Z3, контакторов KM1 – KM10, испытываемых электрических машин M1 и M2, валы которых соединяются специальным соединительным устройством с двумя подвижными полумуфтами. Применение согласующих трансформаторов и синус-фильтров в данном схемном решении является основным отличием от существующих стендов.

Соединительное устройство состоит из следующих основных узлов: из муфт упругих втулочно-пальцевых (МУВП), фиксаторов с храповым механизмом, шлицевого вала, ступицы (корпуса), основания, подшипниковых щитов, электромеханического тормоза, датчиков оборотов и системы управления.

Структурная схема соединительного устройства приведена на рис. 2.

Сочленение валов происходит с помощью двух МУВП 1 (рис. 2), состоящих из двух полумуфт, пальцев с резиновыми втулками, через которые пальцы взаимодействуют с другой полумуфтой.

Ведущие полумуфты одеты на шлицевой вал 6 (рис. 2) и имеют возможность продольного перемещения. Фиксация ведущих полумуфт, в рабочем положении осуществляется с помощью фиксаторов с храповым механизмом 4 (рис. 2). Ведомые полумуфты надеваются на валы испытываемых электрических машин с использованием шпоночного соединения и фиксируются торцевыми гайками [8 – 10].

Торможение и фиксация в неподвижном положении валов испытываемых АЭМ осуществляется с помощью электромеханического тормоза 7 (рис. 2).

Электромеханический тормоз позволяет быстро останавливать испытываемые АЭМ и удерживать их в неподвижном состоянии сколь угодно долго.

Электромеханический тормоз состоит из электромагнита, якоря и тормозного диска. Электромагнит представляет собой набор катушек, распо-

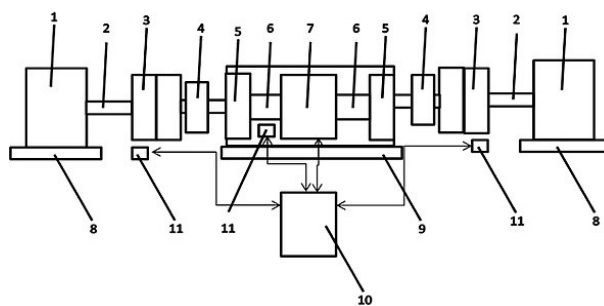


Рис. 2. Структурная схема соединительного устройства:

- 1 — испытываемая электрическая машина;
- 2 — вал испытываемой электрической машины; 3 — МУВП;
- 4 — фиксаторы; 5 — подшипниковый щит;
- 6 — шлицевой вал; 7 — электромеханический тормоз;
- 8 — подрамник; 9 — основание; 10 — система управления;
- 11 — датчик оборотов

ложенных в специализированном корпусе. Якорь электромагнита является основной исполнительной частью тормоза и представляет собой антифрикционную поверхность, взаимодействующую с тормозным диском.

Тормозной диск, на поверхность которого нанесен фрикционный материал, имеет возможность перемещения по шлицам втулки на валу. Когда в катушки электромагнита подано питающее напряжение, якорь находится в оттянутом положении, и позволяет валу свободно вращаться вместе с тормозным диском.

Торможение осуществляется в свободном состоянии при снятии напряжения с катушек электромагнита, в этот момент пружины нажимают на якорь, и он, в свою очередь, оказывает воздействие на тормозной диск, вызывая тем самым остановку вала.

При возникновении аварийной ситуации или при отсутствии питания тормозного устройства предусмотрена возможность отключения тормоза ручным способом.

Система управления 10 (рис. 2) предназначена для контроля и управления торможением асинхронных испытываемых электрических машин. Система управления получает сигналы с трех датчиков

оборотов 11 (рис. 2) о частоте вращения валов испытуемых электрических машин и вращения шлицевого вала соединительного устройства. Наличие трех датчиков оборотов необходимо для того, чтобы производить отслеживание числа оборотов при холостом ходе испытуемых электрических машин, когда МУВП разъединены. Датчик оборотов, установленный непосредственно внутри соединительного устройства, также выполняет функцию датчика положения, предотвращая ложное срабатывание электромеханического тормоза.

Предложенная структурная схема испытательного стенда (рис. 1) работает следующим образом. Трехфазное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц от питающей сети предприятия подается на входы преобразователя частоты UZ1, через автоматический выключатель QF1 и силовой контактор KM1. Напряжение, поданное на вход частотного преобразователя UZ1, фактически подается на вход его выпрямителя, а выпрямленное напряжение подается в звено постоянного тока и далее на вход управляемого инвертора. С выхода инвертора, который является выходом частотного преобразователя,

частотно-модифицированное напряжение подается на вход синус-фильтров Z1 и Z3. С выхода синус-фильтров сглаженное напряжение подается на первичную обмотку силового трансформатора TV1. Трансформатор TV1 имеет расщепленную вторичную обмотку, к которой с помощью контакторов KM2 – KM4 подключается асинхронная испытуемая машина, работающая в режиме двигателя. Выбор режимов работы генератор/двигатель для испытуемых асинхронных электрических машин осуществляется силовыми контакторами KM5 и KM7. Электрическая машина M1, работающая в режиме двигателя подключается к выводам контактора KM5, а электрическая машина M2, работающая в режиме генератора к выводам контактора KM7. Проведение испытаний по опыту холостого хода и опыту короткого замыкания для асинхронной электрической машины M2, которая работала в режиме генератора, обеспечивается с помощью контактора KM6.

Для того чтобы создать нагрузку на валу испытуемого двигателя, частота питающего напряжения, которое подается на выводы электрической маши-

ОП "Элмашремонт-Ростов-на-Дону" "Локотех Электромашинный дивизион"
Протокол приемо - сдаточных испытаний № 31 от 14.12.2022 г.

Двигатель: АНЭМ225L4. Вид ремонта: КР. Номер статора: 0001. Номер ротора: 0001.

Температура окр. среды - 20°C

Проверка работы на холостом ходу в течении 20 мин., при U = (180 - 200) В и f = Гц - Прошел

Сопrotивление изоляции обмоток

Параметр	Норма, МОм	Факт, МОм	Результат
в холодном состоянии	100	35895,0	Норма
в горячем состоянии	2	1201,6	Норма

Активное сопротивление обмоток

Параметр	Норма, Ом	Факт, Ом		
		C1	C2	C3
в холодном состоянии, при 20 °С	0,02800 - 0,03200	0,02856	0,02866	0,02845
в горячем состоянии		0,03376	0,03373	0,03398
результат		Норма	Норма	Норма

Температура подшипников и перегрев обмоток

Температура	Обмотка C1	Обмотка C2	Обмотка C3	Подшипник 1	Подшипник 2
Норма, °С	≤ 160			≤ 80	
Факт, °С	42	40	45	28	28
Результат	Норма	Норма	Норма	Норма	Норма

Опыт холостого хода

Параметр	Uл, В	Iф, А	Pa, кВт	Pp, кВт	Pп, кВт	cos φ
C1	376	70	1.1	15.2	15.2	0.072
C2	374	69	0.7	14.8	14.9	0.046
C3	368	70	1.2	14.8	14.9	0.083

Ток xx I_в, А - 70,9, норма (≤ 85,0).

Потери xx P_в, кВт - 3,1, норма (≤ 3,2)

Нагрев в течении 60 мин. при токе I19 А и напряжении 380 В - Прошел

Параметр	Uл, В	Iф, А	Pa, кВт	Pp, кВт	Pп, кВт	cos φ
C1	377	118	20	16.2	25.7	0.779
C2	370	118	19.4	16.2	25.4	0.769
C3	368	120	19.8	16	25.3	0.776

Опыт короткого замыкания

Параметр	Uл, В	Iф, А	Pa, кВт	Pp, кВт	Pп, кВт	cos φ
C1	108	238	7.6	12.6	14.8	0.514
C2	104	237	6.4	12.8	14.3	0.446
C3	100	239	7.2	11.8	13.8	0.52

Ток кз Iкз, А - 229,0, норма (200,0 - 240,0).

Потери кз Pкз, кВт - 19,7, норма (15,8 - 21,0)

Частота вращения в номинальном режиме: N_д = 1452 об/мин, норма (1430 ± 70).

Номинальный момент - M_н = 360 Н·м

Минимальный момент - M_{мин} = 0 Н·м

Максимальный момент - M_{макс} = 0 Н·м

Скольжение - s = 3,2, норма ≤ 4,5

КПД - η = 93 %, норма ≥ 90

Испытание на кратковременную перегрузку по току

I (норма), А	I (факт), А	Длительность, мин.	Результат
180	180	1	Прошел

Кратность моментов:

Кратность мин. момента - 0, норма - 4,0

Кратность макс. момента - 0, норма - 4,3

Испытание на повышенную частоту вращения

n (норма), об/мин	n (факт), об/мин	Длительность, мин.	Результат
1800	1800	2	Выдержал

Испытание прочности междувитковой изоляции

Uмвз (норма), В	Uмвз (факт), В	Длительность, мин.	Результат
570	565	5	Выдержал

Измерение уровня вибрации (виброизмерительный прибор VibroVision №2092)

p (норма), об/мин	p (факт), об/мин	Vc (норма), мм/с	Vc (факт), мм/с	Результат
1430	1430	2,8	1,8	Норма

Испытание электрической прочности изоляции обмоток статора относительно корпуса переменным током 50 Гц в течении 1 минуты, при напряжении 2350 В - Выдержал

Заключение: _____

Мастер: РАГОЙЖА Е. А.

Испытатель: РАГОЙЖА Е. А.

Рис. 3. Протокол приемо-сдаточных асинхронных электрических машин типа АНЭМ225L4 для ОП «Элмашремонт-Ростов-на-Дону»

ны М2 снижается, при этом происходит переход асинхронной электрической машины в генераторный режим.

Напряжение с обмотки статора электрической машины М2 поступает на вторичную обмотку трансформатора TV2 и далее через синус-фильтр Z2 на выход частотного преобразователя UZ2. С инвертора преобразователя UZ2 напряжение попадает на звено постоянного тока преобразователя UZ2. С выхода звена постоянного тока преобразователя UZ2 через контактор KM8 постоянное напряжение подается на звено постоянного тока преобразователя UZ1, далее процесс преобразования и подачи напряжения на испытываемую электрическую машину происходит, как описано выше.

Энергия, потребляемая из питающей сети преобразователем UZ2, расходуется на питание системы управления данного преобразователя.

Для контроля параметров тока, напряжения, мощности и $\cos \phi$ испытываемых асинхронных электрических машин в предложенной схеме применены трехфазные ваттметры PW1, PW2, подключенные через трансформаторы тока ТА1—ТА6 и добавочные сопротивления R1, R2.

Работоспособность данного схемного решения была опробована в следующих испытательных стендах:

— «Автоматизированная испытательная станция электрических машин переменного тока типа АНЭ-225, АНЭ-200, НВА-55, НВА-55С, АЭ-92-4, АНЭМ-225» (Ростовский локомотиворемонтный завод);

— «Стенд испытания электрических машин переменного тока» (депо Александров, г. Александров);

— «Стенд испытания асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт» (депо Хабаровск, г. Хабаровск);

— «Испытательная станция вспомогательных электрических машин постоянного и переменного тока» (Челябинский электровозоремонтный завод);

— «Испытательная станция вспомогательных машин электроваза 2ЭС6» (депо Московка, г. Омск);

— «Испытательная станция вспомогательных электрических машин постоянного и переменного тока» (Оренбургский локомотиворемонтный завод).

Результаты проведения испытаний асинхронных электрических машин сводятся в протоколе испытаний, форма которого приведена на рис. 3.

Существующие схемы проведения испытаний имеют ряд существенных недостатков: невозможность испытания одновременно двух АЭМ, невозможность проведения испытания при частоте вращения, превышающей номинальную, сложность конструкции, избыточность оборудования, невозможность проведения испытания на наличие междувиткового замыкания при повышенном напряжении, поочередное проведение испытаний по методу короткого замыкания для каждой испытываемой АЭМ в отдельности, и т.д.

Описанное в статье схемное решение стенда:

— позволяет производить все виды проверок (опыт холостого хода, короткого замыкания, нагревания, испытание на наличие междувиткового замыкания и т.д.) при проведении приемо-сдаточных испытаний одновременно для двух испытываемых АЭМ;

— обеспечивает компенсацию колебаний и снижения напряжения питающей сети;

— фильтрация ШИМ-модифицированного напряжения с выхода частотного преобразователя;

— имеет возможность унификации испытательных стендов для проведения приемо-сдаточных испытаний АЭМ;

— применено комплексное соединительное устройство для фиксации (сочленения) валов асинхронных электрических машин при проведении испытаний по методу взаимной нагрузки, короткого замыкания и холостого хода.

Библиографический список

1. Пат. 143348 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/00. Устройство для испытания асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В. № 2014112919/28; заявл. 02.04.14; опубл. 20.07.14. 6 с. Бюл. № 20.
2. Пат. 2023274 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Устройство для испытания асинхронного тягового двигателя с короткозамкнутым ротором / Талья И. И. № 4920613/22; заявл. 19.03.91; опубл. 15.11.94. 6 с.
3. Пат. № 2071608 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Устройство для испытания без коллекторных электрических машин переменного тока / Талья И. И. № № 5055535/07; заявл. 21.07.92; опубл. 10.01.97. 7 с.
4. Пат. № 2214613 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Способ снятия характеристик разнородных электрических машин / Рекус Г. Г., Рекус Н. Г., Рекус И. Г. № 2001135457/09; заявл. 28.12.01; опубл. 20.10.03. 8 с.
5. Пат. № 2334993 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Устройство испытания асинхронных двигателей под нагрузкой / Леоненко С. С., Леоненко А. С., Прокопьев А. Ю. № 2007119699/28; заявл. 28.05.07; опубл. 27.09.08. Бюл. № 27. 9 с.
6. Пат. 2433419 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Способ испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / Авилов В. Д., Володин А. И., Данковцев В. Т., Лукьянченко В. В., Панькин Е. В. № 2010124307/28; заявл. 15.06.10; опубл. 10.11.2011. Бюл. № 31. 6 с.
7. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Введ. 2015—01—01. Москва: Стандартинформ, 2014. 52 с.
8. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. / Под ред. И. Н. Жестковой. 8-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2001, 912 с.
9. Поляков В. С., Барбаш И. Д., Ряховский О. А. Справочник по муфтам. Ленинград: Машиностроение, 1974. 352 с.
10. ГОСТ 21424-93. Муфты упругие втулочно-пальцевые. Параметры и размеры. Введ. 1996—07—01. Москва: Изд-во стандартов, 1996. 12 с.

БУБЛИК Антон Владимирович, ведущий инженер-конструктор ООО «ТПИ», г. Омск.

SPIN-код: 3878-4751

Адрес для переписки: anvbublik@mail.ru

БУБЛИК Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск

SPIN-код: 5301-3507

AuthorID (РИНЦ): 564405

Адрес для переписки: bublikvv52@mail.ru

ЕСИН Николай Васильевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Подвижной

состав электрических железных дорог» ОмГУПС,
г. Омск.

SPIN-код: 8503-2172

AuthorID (РИНЦ): 649133

Адрес для переписки: nikve@mail.ru

ТИТАНАКОВ Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы» ОмГУПС, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 451142

Адрес для переписки: titanakovda@mail.ru

Для цитирования

Бублик А. В., Бублик В. В., Есин Н. В., Титанакон Д. А. Стенд для проведения приемо-сдаточных испытаний асинхронных электрических машин методом взаимной нагрузки // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 77–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-77-83.

Статья поступила в редакцию 05.05.2023 г.

© А. В. Бублик, В. В. Бублик, Н. В. Есин, Д. А. Титанакон

UDC 629.018

DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-77-83

EDN: KNXHUQ

A. V. BUBLIK¹

V. V. BUBLIK²

N. V. YESIN²

D. A. TITANAKOV²

¹ LLC «TPI»,
Omsk, Russia

² Omsk State
Transport University,
Omsk, Russia

THE STAND FOR CONDUCTING ACCEPTANCE TESTS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES BY METHOD OF MUTUAL LOADING

Improving the reliability and increasing the operational life of electrical equipment of electric rolling stock is one of the eight directions of scientific and technical development of JSC «Russian Railways» described in the target program «Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030», approved by the decree of the Government of the Russian Federation.

The solution to the problem of improving operational reliability is associated with comprehensive measures that include a wide range of issues aimed at ensuring the stable operation of rolling stock and its systems.

Reliable operation of electric machines, which depends on the quality of repairs, has a significant impact on the operational reliability of electric rolling stock.

Keywords: asynchronous electric machines, mutual load method, frequency converter, sine filter, acceptance tests, test benches.

References

1. Patent 143348 Russian Federation, IPC G 01 R 31/00. Ustroystvo dlya ispytaniya asinkhronnykh dvigateley metodom ikh vzaimnoy nagruzki [Device for testing asynchronous motors by the method of their mutual loading:] / Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. No. 2014112919/28. (In Russ.).
2. Patent 2023274 Russian Federation, IPC G 01 R 31/34. Ustroystvo dlya ispytaniya asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom [Gear to test asynchronous traction motor with squirrel-cage rotor] / Talya I. I. No. 4920613/22. (In Russ.).
3. Patent 2071608 Russian Federation, IPC G 01 R 31/34. Ustroystvo dlya ispytaniya bez kollektornykh elektricheskikh mashin peremennogo toka [Gear to test collectorless a c electric machines] / Talya I. I. No. 5055535/07. (In Russ.).

4. Patent 2214613 Russian Federation, IPC G 01 R 31/34. Sposob snyatiya kharakteristik raznorodnykh elektricheskikh mashin [Method to measure characteristics of heterogeneous electric machines] / Rekus G. G., Rekus N. G., Rekus I. G. No. 2001135457/09. (In Russ.).

5. Patent 2334993 Russian Federation, IPC G 01 R 31/34. Ustroystvo ispytaniya asinkhronnykh dvigateley pod nagruzkoй [Device to test induction motors under load] / Leonenko S. S., Leonenko A. S., Prokop'yev A. Yu. No. 2007119699/28. (In Russ.).

6. Patent 22433419 Russian Federation, IPC G 01 R 31/34. Sposob ispytaniya asinkhronnykh elektrodvigateley metodom ikh vzaimnoy nagruzki [Back-to-back test method for asynchronous motors] / Avilov V. D., Volodin A. I., Dankovtsev V. T., Luk'yanchenko V. V., Pan'kin E. V. No. 2010124307/28. (In Russ.).

7. GOST 2582-2013. Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiyesya tyagovyye. Obshchiye tekhnicheskiye

usloviya [Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications]. Moscow, 2014. 52 p. (In Russ.).

8. Anur'yev V. I. Spravochnik konstruktora-mashinostroytelya. V 3 t. / Ed. by I. N. Zhestkovoy. 8th ed. Moscow, 2001, 912 p. (In Russ.).

9. Polyakov V. S., Barbash I. D., Ryakhovskiy O. A. Spravochnik po muftam [Coupling Guide]. Leningrad, 1974. 352 p. (In Russ.).

10. GOST 21424-93. Mufty uprugiyе vtulochno-pal'tsevyye. Parametry i razmery [Flexible couplings with rubber-bushed studs. Parameters and dimensions]. Moscow, 1996. 12 p. (In Russ.).

BUBLIK Anton Vladimirovich, Leading Design Engineer, LLC «TPI», Omsk.

SPIN-code: 3878-4751

Correspondence address: anvbublik@mail.ru

BUBLIK Vladimir Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Railway Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5301-3507

AuthorID (RSCI): 564405

Correspondence address: bublikvv52@mail.ru

ESIN Nikolay Vasilyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Railway Rolling Stock Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 8503-2172

AuthorID (RSCI): 649133

Correspondence address: nikve@mail.ru

TITANAKOV Denis Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Locomotives Department, OSTU, Omsk.

AuthorID (RSCI): 451142

Correspondence address: titanakovda@mail.ru

For citations

Bublik A. V., Bublik V. V., Yesin N. V., Titanakov D. A. The stand for conducting acceptance tests of asynchronous electric machines by method of mutual loading // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 77–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-77-83.

Received May 05, 2023.

© A. V. Bublik, V. V. Bublik, N. V. Yesin, D. A. Titanakov

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО- РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

В статье рассматривается построение имитационной модели электротехнического комплекса, включающего асинхронный электродвигатель с частотным регулированием, приводящим в движение центробежный насос. Станции перекачки жидкости на основе центробежных насосов с асинхронными электроприводами, управляемыми преобразователями частоты, широко применяются, что обуславливает актуальность работы. Получение динамических характеристик данных приводов дает возможность понять взаимосвязь распределения энергии, а также согласовать режимы работы его основных частей. С этой целью была разработана имитационная модель электропривода станции перекачки жидкости. Данная имитационная модель использовалась для проведения численных экспериментов системы, включающей в себя силовой канал электропривода, гидравлическую подсистему, а также систему управления. В качестве среды для моделирования использовался программный продукт Simintech. В работе получены переходные процессы координат электропривода при воздействии как со стороны гидравлической нагрузки, так и со стороны электропитания. Показано влияние гидравлического сопротивления напорного трубопровода и статического противодействия на механическую характеристику момента сопротивления электропривода в целом. Рассмотренный подход расчета характеристик позволяет оценить взаимовлияние координат различной физической природы установок центробежных насосов с асинхронным частотно-регулируемым электродвигателем друг на друга.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, трубопровод, центробежный насос, инвертор, переходные процессы.

Введение. Широкое применение электропривода центробежных насосов обуславливает большой интерес к исследованиям в области моделирования, учета режимных параметров, уточнения методик расчета турбомеханизмов с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом. Такие комплексы имеют подсистемы различной физической природы [1, 2]. Часто при рассмотрении вопросов динамики и статики [3, 4] установок центробежных насосов с асинхронным двигателем и частотным преобразователем одну из подсистем значительно упрощают в силу разных причин [5, 6]. Так, например, в инженерных расчетах механическая характеристика сопротивления насоса представляется квадратичной зависимостью, при этом параметры и особенности работы насоса на гидравлическую нагрузку не учитываются вовсе.

Значительная часть установок по перекачке жидкости [7] работает на сеть со статическим напором или противодействием, что влияет как на статические характеристики, так и на динамические характеристики электропривода в целом [8]. В статье приводится как методика расчета таких комплексов, так показано, на какие конкретно ха-

рактеристики влияют режимы работы гидравлической нагрузки насоса.

Математическое описание. Для описания электромагнитных процессов асинхронного электродвигателя принята модель с двойной беличьей клеткой в двухфазной системе координат, которая состоит из пяти дифференциальных уравнений электромагнитной подсистемы и одного алгебраического уравнения (1). Выбор данной модели обусловлен значительным повышением точности моделирования [9] для двигателей с мощностью выше 100 кВт.

Описание асинхронной машины с одной беличьей клеткой (1) приведено в [10]:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} = \vec{u}_S - R_S \vec{i}_S - j\omega_0 \vec{\Psi}_S \\ \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} = -R_R \vec{i}_R - j(\omega_0 - Z_p \omega) \vec{\Psi}_R \\ \vec{\Psi}_S = L_S \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R \\ \vec{\Psi}_R = L_R \vec{i}_R + L_m \vec{i}_S \\ \vec{\Psi}_m = (\vec{i}_S + \vec{i}_R) L_m \\ T_E = k \text{Mod}(\vec{\Psi}_i \times \vec{i}_k) \end{cases}, \quad (1)$$

где $\vec{u}_s, \vec{i}_s, \vec{\Psi}_s, \vec{u}_R, \vec{i}_R, \vec{\Psi}_R$ — напряжение, ток и потокосцепление статора и ротора соответственно; $\vec{\Psi}_m$ — потокосцепление ветви намагничивания; ω , ω_0 — частота вращения ротора и частота вращения системы координат; T_E — момент на валу машины.

Уравнения описания электромагнитных процессов асинхронного электродвигателя с двойной беличьей клеткой можно получить из (1), добавив соответствующие соотношения для роторной цепи с двойной клеткой (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} = \vec{u}_s - R_s \vec{i}_s - j\omega_0 \vec{\Psi}_s \\ \frac{d\vec{\Psi}_{R1}}{dt} = -R_{R1} \vec{i}_{R1} - j(\omega_0 - Z_p \omega) \vec{\Psi}_{R1} \\ \frac{d\vec{\Psi}_{R2}}{dt} = -R_{R2} \vec{i}_{R2} - j(\omega_0 - Z_p \omega) \vec{\Psi}_{R2} \\ \vec{\Psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m (\vec{i}_{R1} + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\Psi}_{R1} = L_{R1} \vec{i}_{R1} + L_m (\vec{i}_s + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\Psi}_{R2} = L_{R2} \vec{i}_{R2} + L_m (\vec{i}_s + \vec{i}_{R1}) \\ \vec{\Psi}_m = (\vec{i}_s + \vec{i}_{R1} + \vec{i}_{R2}) L_m \\ T_E = k_1 \text{Mod}(\vec{\Psi}_i \times \vec{i}_k) + k_2 \text{Mod}(\vec{\Psi}_j \times \vec{i}_n), \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\vec{i}_{R1}, \vec{i}_{R2}, \vec{\Psi}_{R1}, \vec{\Psi}_{R2}$ — токи, потокосцепления первой и второй ветвей схемы замещения ротора соответственно.

Исключив из (2) $\vec{i}_{R1}, \vec{i}_{R2}, \vec{\Psi}_s$, а также записав (2) для неподвижной системы с вещественной и мнимой осями α и β , получим (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{S\alpha} = R_s i_{S\alpha} + k_{is} \frac{di_{S\alpha}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} = R_s i_{S\beta} + k_{is} \frac{di_{S\beta}}{dt} + k_{R2} \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1} \frac{d\psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\alpha} + Z_p \omega \psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2} R_{R1} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R1}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R1} L_m}{\sigma} \psi_{R2\beta} - Z_p \omega \psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\alpha} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R1\alpha} + \frac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\alpha} + Z_p \omega \psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1} R_{R2} i_{S\beta} + \frac{1}{T_{R2}} \psi_{R1\beta} + \frac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \frac{R_{R2} L_m}{\sigma} \psi_{R1\beta} - Z_p \omega \psi_{R2\alpha} \\ T_E = \frac{3}{2} Z_p [k_{R2} (\psi_{R1\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R1\beta} i_{S\alpha}) + k_{R1} (\psi_{R2\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R2\beta} i_{S\alpha})], \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{где } k_{R1} &= \frac{L_{R1} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}, \quad k_{R2} = \frac{L_{R2} L_m - L_m^2}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}, \\ \sigma &= L_{R1} L_{R2} - L_m^2, \quad T_{R1} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R1} L_{R2}}, \quad T_{R2} = \frac{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}{R_{R2} L_{R1}}, \\ k_{is} &= \frac{L_s L_{R1} L_{R2} - L_s L_m^2 - L_{R1} L_m^2 - L_{R2} L_m^2 + 2L_m^3}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2} \end{aligned}$$

$L_{R1}, L_{R2}, L_m, R_{R1}, R_{R2}, R_s$ — параметры схемы замещения;

$i_{S\alpha}, i_{S\beta}$ — $\alpha\beta$ составляющие тока статора (А);
 $\psi_{R1\alpha}, \psi_{R1\beta}, \psi_{R2\alpha}, \psi_{R2\beta}$ — $\alpha\beta$ составляющие потокосцепления ротора (В·с).

Вектор потокосцепления ротора, согласно (1) и (2), с учетом $\vec{\Psi}_{R1} = \vec{\Psi}_{R1\sigma} + \vec{\Psi}_m$, $\vec{\Psi}_{R2} = \vec{\Psi}_{R2\sigma} + \vec{\Psi}_m$, определяется как (4):

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_R &= \vec{\Psi}_{R\sigma} + \vec{\Psi}_m = \vec{\Psi}_{R1\sigma} + \vec{\Psi}_{R2\sigma} + \vec{\Psi}_m = \\ &= \vec{\Psi}_{R1\sigma} + \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{R2\sigma} + \vec{\Psi}_m - \vec{\Psi}_m = \\ &= \vec{\Psi}_{R1} + \vec{\Psi}_{R2} - \vec{\Psi}_m, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{\Psi}_{R\sigma}, \vec{\Psi}_{R1\sigma}, \vec{\Psi}_{R2\sigma}$ — потокосцепления рассеивания ротора, первой и второй ветвей схемы замещения ротора соответственно.

Модуль потокосцепления ротора, согласно (4), определяется как (5):

$$\Psi_R = \sqrt{(\psi_{R1\alpha} + \psi_{R2\alpha} - \psi_{m\alpha})^2 + (\psi_{R1\beta} + \psi_{R2\beta} - \psi_{m\beta})^2}, \quad (5)$$

где $\psi_{m\alpha}, \psi_{m\beta}$ — $\alpha\beta$ составляющие главного потокосцепления (В·с).

Составляющие главного потокосцепления определяются, согласно (1), как (6):

$$\psi_{m\alpha(\beta)} = (i_{S\alpha(\beta)} + i_{R\alpha(\beta)}) L_m. \quad (6)$$

При этом $i_{R\alpha(\beta)}$ — $\alpha\beta$ составляющие обобщенного тока ротора, определяемые по выражению (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{R\alpha(\beta)} = i_{R1\alpha(\beta)} + i_{R2\alpha(\beta)} \\ i_{R1\alpha(\beta)} = \frac{L_m \psi_{R2\alpha(\beta)} - L_m^2 i_{S\alpha(\beta)} - L_{R2} \psi_{R1\alpha(\beta)} + L_m L_{R2} i_{S\alpha(\beta)}}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2} \\ i_{R2\alpha(\beta)} = \frac{L_m \psi_{R1\alpha(\beta)} - L_m^2 i_{S\alpha(\beta)} - L_{R1} \psi_{R2\alpha(\beta)} + L_m L_{R1} i_{S\alpha(\beta)}}{L_{R1} L_{R2} - L_m^2}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Механическая подсистема, связывающая механические координаты двигателя и насоса, может быть представлена системой (8):

$$\begin{cases} T_{p\Sigma} = (T_p + T_{p0}) \cdot \text{sign}(\omega) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_E - T_{p\Sigma}}{J_\Sigma} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases}, \quad (8)$$

где $T_{p\Sigma}$ — суммарный момент сопротивления нагрузки (Н·м);

T_p, T_{p0} — момент сопротивления центробежного насоса при ненулевом расходе жидкости и момент сил трения (Н·м);

θ — угол поворота ротора (рад);

J_Σ — суммарный момент инерции двигателя и центробежного насоса.

Центробежный насос нагнетающий давление в напорном трубопроводе параметризуется с помощью полинома второй степени (9) [11].

$$h = \frac{1}{g} \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right)^2 \left(C_0 - C_1 q \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) - C_2 \left(q \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right)^2 - C_3 \left(q_{nom} - q \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right)^2 \right), \quad (9)$$

где h — мгновенное значение напора, развиваемого насосом (м);

q — мгновенное значение расхода, развиваемого насосом (м³/с);

ω — угловая скорость вращения вала насоса (рад/с);

C_0, C_1, C_2, C_3 — коэффициенты аппроксимации, определяемые по паспортным данным или экспериментальным путем.

Момент сопротивления, создаваемый насосом, определяется как (10):

$$T_L = \frac{\rho q \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \left(C_0 - C_1 q \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right) \right) \left(\frac{\omega_{nom}}{\omega} \right)^3}{\omega}, \quad (10)$$

где ρ — плотность перекачиваемой жидкости (кг/м³).

Имитационная модель. Модель механической подсистемы в пакете Simintech [12] представлена на рис. 1. Входным воздействием на механическую подсистему является суммарный электромагнитный момент асинхронного двигателя T_E , а также момент сопротивления момент сопротивления центробежного насоса при ненулевом расходе жидкости. Для задания электромагнитного момента и момента сопротивления используются блоки задания моментов **ИМ1** и **ИМ2**. Данные блоки соединяются с блоком задания момента инерции J посредством механической вращательной связи (**МВС**). Вывод значения текущей угловой скорости и угла поворота осуществляется с датчика угловой скорости (**ДСУ**). Таким образом, подсистема передает вращающий момент двигателя на центробежный насос, а момент сопротивления насоса передает на асинхронный электродвигатель и измерительную часть для представления результатов расчета.

Гидравлическая подсистема содержит центробежный насос с питающим трубопроводом,

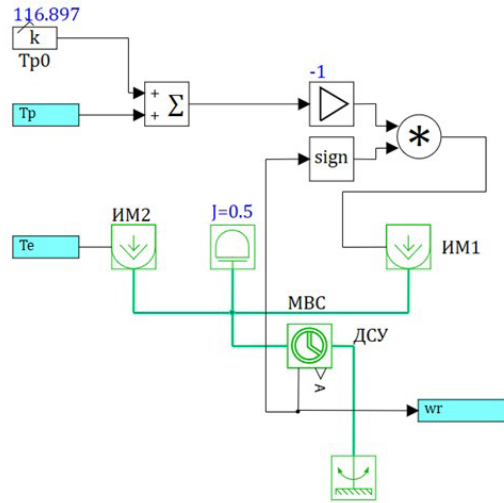


Рис. 1. Модель механической подсистемы

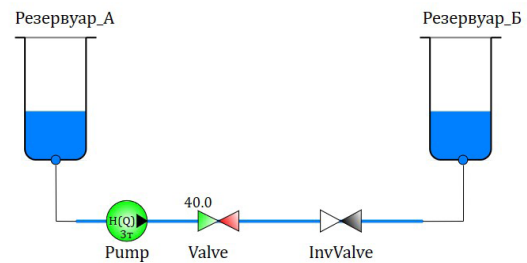


Рис. 2. Гидравлическая подсистема

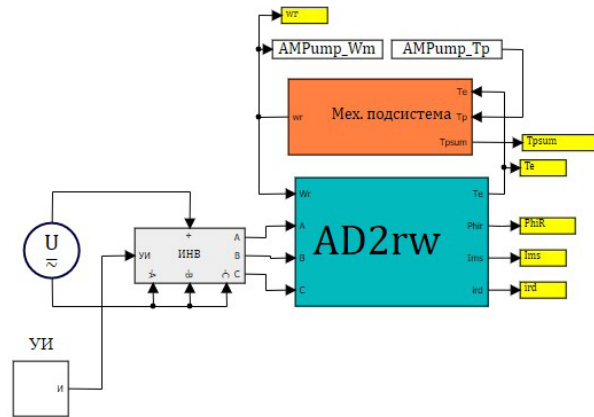


Рис. 3. Электромеханическая подсистема

подключенным к резервуару с водой, напорный трубопровод с обратным клапаном и задвижку, подключенную к емкости, уровень жидкости в которой можно регулировать. Подсистема, приведенная на рис. 2, включает в себя подающий и напорный резервуары (**Резервуар_А**, **езервуар_Б**) с трубопроводами к ним, центробежный насос (**Pump**), запорную арматуру (**Valve**) и обратный клапан (**InValve**). Свойства жидкости задаются в блоке **Резервуар_А**. Давление в резервуаре не изменяется при изменениях объема перекачиваемой жидкости. Противодействие для насоса задается в блоке **Резервуар_Б**. Геометрические параметры трубопровода, а также степень открытия задвижки **Valve** мо-

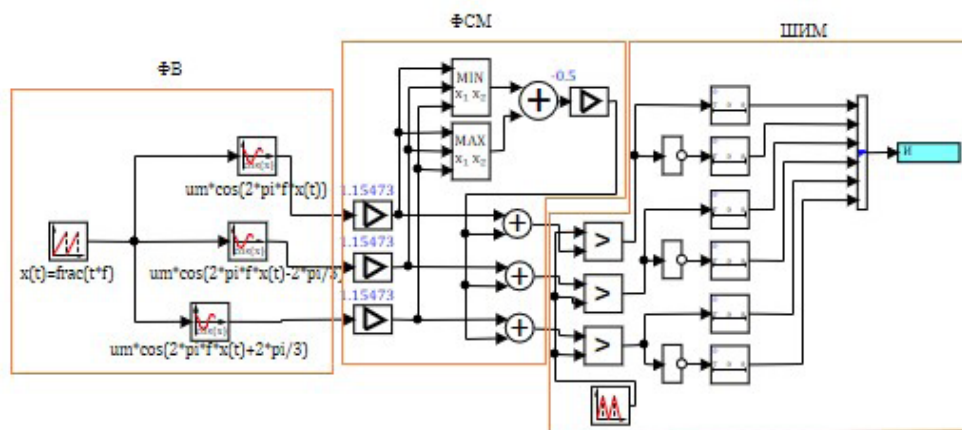


Рис. 4. Система управления инвертором

Таблица 1

Параметры модели электронасосного агрегата мощностью 200 кВт

R_s , мОм	R_{R1} , мОм	R_{R2} , мОм	L_m , мГн	L_s , мГн	L_{R1} , мГн	L_{R2} , мГн	C_0 , Па/(кг/м ³)	C_1 , Па/кг	C_2 , мПа·с ² /(кг/м ³)	C_3 , мПа·с ² /(кг/м ³)	J_Σ , кг·м ²
111	12,51	73,11	12,2	12,36	18,69	12,4	888251,2	2,507	0,6964	0,05	0,5

делюют локальные потери давления. Перекачиваемая жидкость поступает в емкость (**Резервуар Б**) бесконечного объема. Для моделирования режимов работы установки с противодавлением необходимо указать уровень жидкости в ёмкости. Также можно указать избыточное давление в данном резервуаре. Сам трубопровод моделируется с помощью блока **Канал**, потери давления в котором определяются по закону Дарси.

Имитационная модель электромеханической подсистемы рис. 3. содержит трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и двойной беличьей клеткой, получающий питание от трехфазного мостового инвертора. Управление трехфазным инвертором осуществляется с помощью ШИМ-модуляции. Модель системы управления инвертором представлена на рис. 4. Требуемая частота выходного напряжения инвертора, а также амплитуда этого напряжения задается блоком **ФВ**. **ФВ** формирует вектор задающего напряжения. Блок **ШИМ** формирует сигналы открывания транзисторов мостового инвертора напряжения **ИНВ**. Частота ШИМ составляет 2000 Гц. Регулирование частоты вращения ротора АД осуществляется скалярным способом, при $U/f = \text{const}$. Для более полного использования напряжения звена постоянного тока применяется блок формирователя способа модуляции **ФСМ**, который добавляет нулевую гармонику к прямой последовательности задающего вектора напряжения.

Результаты моделирования. Численные эксперименты проводились в среде Simintech для электронасосного агрегата мощностью 200 кВт, 3000 об/мин, производительность насоса составляет 200 кубических метров в час, номинальный напор 90 метров водяного столба.

Параметры модели электронасосного агрегата представлены в табл. 1.

Напряжение на входе инвертора составляет 535 В, силовые ключи приняты как идеальные. В процессе исследования рассматривалось поведение параметров состояния динамической системы

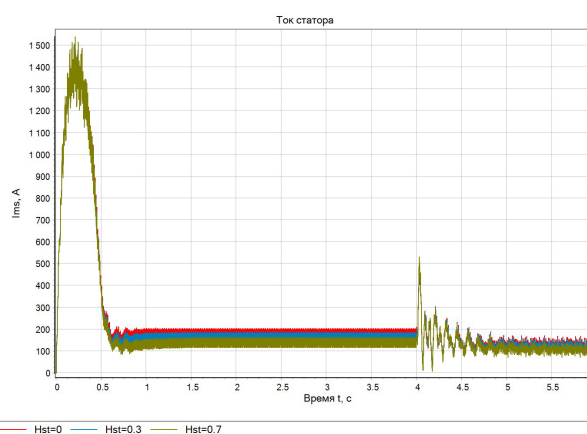


Рис. 5. График переходных процессов обгибающей тока статора

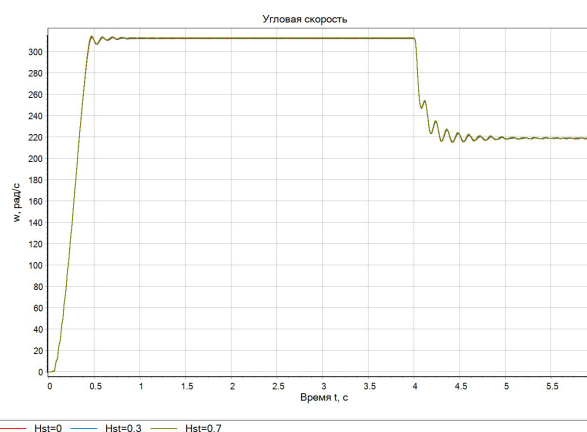


Рис. 6. График переходных процессов угловой скорости ротора асинхронного двигателя

при регулировании частоты и напряжения. Пуск электропривода осуществляется при частоте 50 Гц, в момент времени 2,5 секунды частота уменьшается

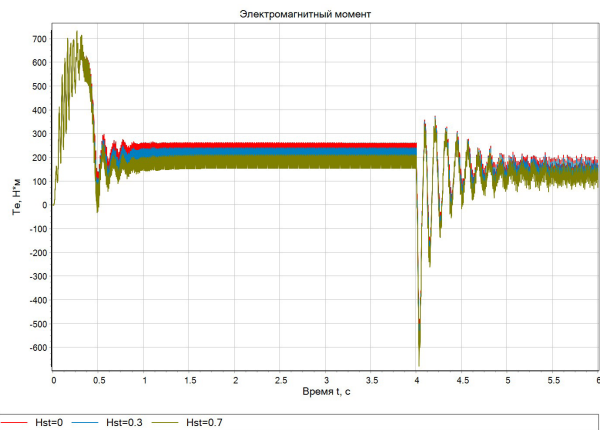


Рис. 7. График переходных процессов электромагнитного момента

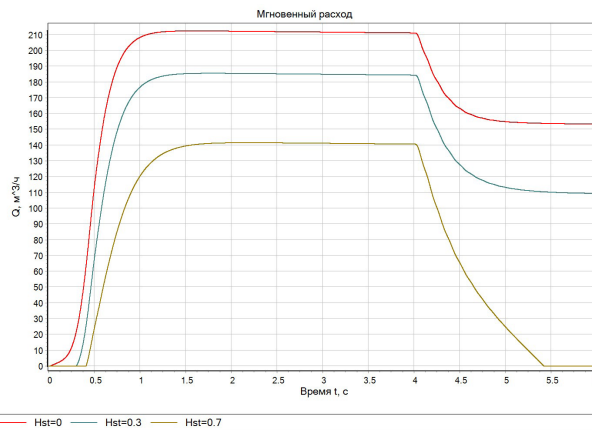


Рис. 10. График переходных процессов объемного расхода жидкости центробежного насоса (Q)

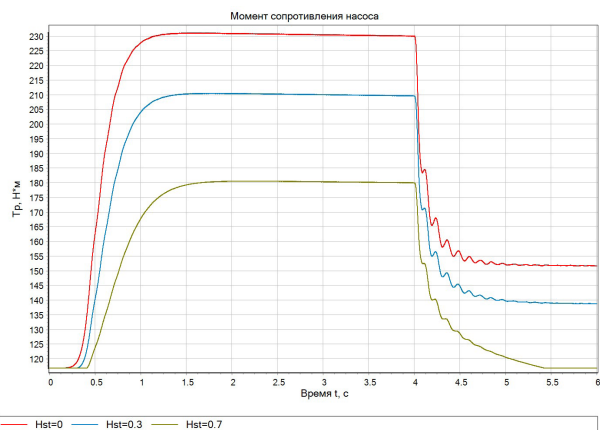


Рис. 8. График переходных процессов момента сопротивления насоса

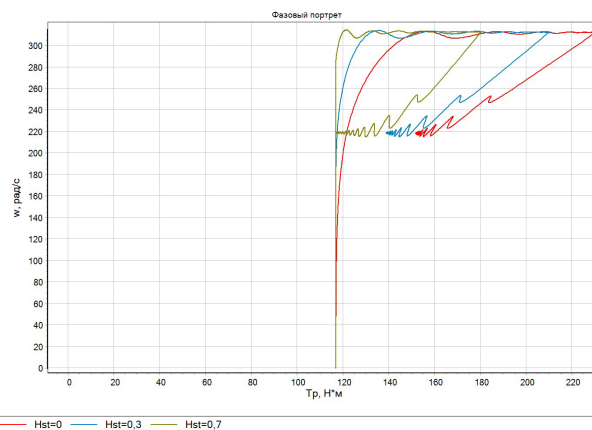


Рис. 11. Зависимость момента сопротивления от угловой скорости

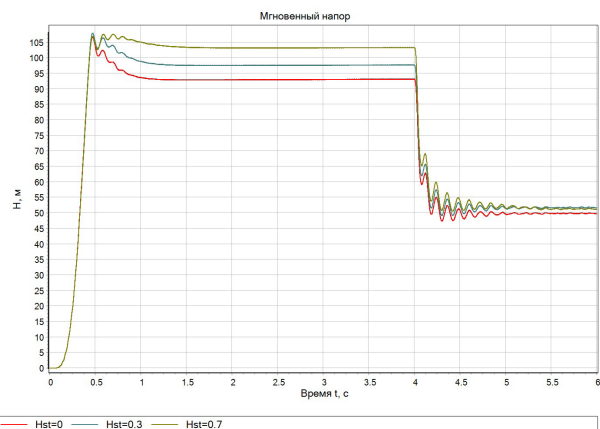


Рис. 9. График переходных процессов напора центробежного насоса (H)

до значения 35 Гц. Параметры переходного процесса определялись решателем обыкновенных дифференциальных уравнений Эйлера.

Результаты моделирования приведены на рис. 5–11. Для оценки влияния режимов работы напорного трубопровода с противодавлением на динамические характеристики, на рис. 5–11 приведены кривые без противодавления (индекс характеристики на $Hst=0$), при статическом противодавлении 27 метров водяного столба (индекс характеристики $Hst=0,3$) и статическом противодавлении

63 метра водяного столба (индекс характеристики $Hst=0,7$).

В качестве перекачиваемой жидкости использовалась вода с объемным содержанием воздуха 0,005, температура воды 20 °С, плотность 997,8 (кг/м³). В системах со статическим давлением на напорном трубопроводе устанавливается обратный клапан для предотвращения обратного течения жидкости. Минимальное давление закрывания клапана принималось 0 Па, максимальное давление открывания 0,1 · 10⁵ Па, постоянная времени открывания клапана составляет 1 с.

Параметры трубопровода круглого сечения принимались следующие: абсолютная шероховатость $1 \cdot 10^{-5}$ м, длина трубопровода — 20 м.

Выводы.

Сравнивая динамические характеристики (рис. 5–11) при различных значениях противодавления, можно сделать следующие выводы:

- кривые тока статора (рис. 5) незначительно отличаются друг от друга по форме;
- при увеличении противодавления уменьшается электромагнитный момент асинхронного двигателя вследствие уменьшения момента нагрузки насоса (рис. 7, 8);
- резкое снижение амплитуды и частоты питающего напряжения приводит к переходу асинхронного двигателя в генераторный режим (рис. 6, 7);
- увеличение статического давления снижает мгновенный расход (рис. 10), что снижает потери

давления в трубопроводе, что, в свою очередь, увеличивает развиваемый напор (рис. 9);

— при значительном противодействии (0,7 о.е. от номинального насоса), при понижении частоты питающего напряжения снижается развиваемый напор, и обратный клапан закрывается, что может характеризоваться временным обратным течением жидкости (рис. 10), асинхронный двигатель работает на момент трения насоса (рис. 11);

— увеличение статического давления приводит к переходу от квадратичного вида механической характеристики сопротивления к линейному, при этом уменьшается длина рабочего участка и увеличивается модуль жесткости характеристики (рис. 11).

В целом предложенная методика позволяет оценить взаимовлияние параметров различной физической природы установок центробежных насосов с асинхронным частотно-регулируемым электродвигателем друг на друга, а также режимов работы отдельных элементов на другие.

Библиографический список

1. Лезнов Б. С., Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. Москва: Энергоатомиздат, 2006. 359 с. ISBN 5-283-00806-1. EDN QNMGHF.
2. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Быстров Е. А. [и др.]. Верификация модели прототипа асинхронного электропривода специального насосного агрегата // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2 (55). С. 25–31. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31. EDN GYMNRA.
3. Гаврилов Д. П., Барабанов В. Г. Разработка и исследование системы управления насосной установкой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2017. Т. 17, № 2. С. 11–19. DOI: 10.14529/engin170202. EDN YTPHWR.
4. Teclé S. I., Ziuzev A. M., Kostylev A. V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022. Vol. 333, no. 11. P. 140–148. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3955. EDN EFKAYN.
5. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И. Я. Браславского. Москва: Academia, 2004. 248 с. ISBN 5-7695-1704-2. EDN QMIONV.
6. Коржев А. А., Толстикова М. В., Ватлина А. М. Моделирование динамических процессов в системе электропривода

пульсонасоса при переменной концентрации перекачиваемой жидкости // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19. EDN SSLZTR.

7. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. Москва: Издат. центр Академия, 2008. 553 с.

8. Еловик В. Л., Войтов И. В., Седухо Ю. П. Расчет и анализ режимов работы центробежных насосов с частотно-регулируемым электроприводом: моногр. Минск: Изд-во БГТУ, 2022. 110 с. ISBN 978-985-897-023-9. EDN NXDWTG.

9. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines // IEE Proceedings – Electric Power Applications. 1997. Vol. 144, Issue 2. P. 101–109. DOI: 10.1049/ip-epa:19970781.

10. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург: Корона. Век, 2011. 368 с. ISBN 978-5-7931-0884-3.

11. Karassis I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Pump Handbook. 3rd ed. McGRAW-HILL New, 2001. 1790 p. ISBN 0-07-034032-3.

12. Хабаров С. П., Шилкина М. Л. Основы моделирования технических систем. Среда Simintech. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 120 с. ISBN 978-5-8114-3526-5. EDN NTKPGG.

ЛЫСЕНКО Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4975-9193

AuthorID (РИНЦ): 643928

ORCID: 0000-0002-7924-5494

AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ResearcherID: N-5528-2015

Адрес для переписки: deolas@mail.ru

Для цитирования

Лысенко О. А. Имитационное моделирование асинхронного частотно-регулируемого электропривода с учетом влияния гидравлической нагрузки центробежного насоса // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 84–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-84-91.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023 г.

© О. А. Лысенко

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF HYDRAULIC LOAD OF CENTRIFUGAL PUMP ON COORDINATES OF ASYNCHRONOUS FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

The article considers the construction of a simulation model of an electrical complex including an asynchronous electric motor with frequency regulation, driving a centrifugal pump. Fluid pumping stations based on centrifugal pumps with asynchronous electric drives controlled by frequency converters are widely used, which makes the work relevant. Obtaining the dynamic characteristics of these drives makes it possible to understand the relationship of energy distribution, as well as to coordinate the operating modes of its main parts. For this purpose, a simulation model of the electric drive of the liquid pumping station is developed. This simulation model is used to carry out numerical experiments of the system, which includes the power channel of the electric drive, as well as the control system. Simintech software product is used as a modeling environment. In the work, transient processes of the coordinates of the electric drive are obtained under the influence of both the hydraulic load and the power supply. The influence of the hydraulic resistance of the pressure pipeline and static back pressure on the mechanical characteristic of the moment of resistance of the electric drive as a whole is shown. The considered approach for calculating the characteristics makes it possible to evaluate the mutual influence of the coordinates of various physical nature of centrifugal pump installations with an asynchronous frequency-controlled electric motor on each other.

Keywords: asynchronous motor, pipeline, centrifugal pump, inverter, transients.

References

1. Leznov B. S., Leznov B. S. Energoberezheniye i reguliruyemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh [Energy saving and variable drive in pump and blower installations]. Moscow, 2006. 359 p. ISBN 5-283-00806-1. EDN QNMGHF. (In Russ.).
2. Bukreyev V. G., Shandarova E. B., Bystrov E. A. [et al.]. Verifikatsiya modeli prototipa asinkhronnogo elektroprivoda spetsial'nogo nasosnogo agregata [Verification of induction motor drive prototype model for special pumping unit] // *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2022. No. 2 (55). P. 25–31. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-25-31. EDN GYMNRA. (In Russ.).
3. Gavrilov D. P., Barabanov V. G. Razrabotka i issledovaniye sistemy upravleniya nasosnoy ustanovkoy [Development and study of control systems pumping unit] // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. Bulletin of the South Ural State University. Series Mechanical Engineering Industry*. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 11–19. DOI: 10.14529/engin170202. EDN YTPHWR. (In Russ.).
4. Teclé S. I., Ziuzev A. M., Kostylev A. V. Improving sucker rod pump efficiency using frequency controlled induction motor // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022. Vol. 333, no. 11. P. 140–148. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3955. EDN EFKAYN. (In Engl.).
5. Braslavskiy I. Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N. Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod [Energy saving asynchronous electric drive] / ed. by I. Ya. Braslavskogo. Moscow, 2004. 248 p. ISBN 5-7695-1704-2. EDN QMIONV. (In Russ.).
6. Korzhev A. A., Tolstikova M. V., Vatlina A. M. Modelirovaniye dinamicheskikh protsessov v sisteme elektroprivoda pul'ponasosa pri peremennoy kontsentratsii perekachivayemoy zhidkosti [Simulation of dynamic processes in the electric drive system of the pulp pump with variable concentration of the pumped liquid] // *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika. Mining Equipment and Electromechanics*. 2023. No. 2 (166). P. 12–19. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19. EDN SSLZTR. (In Russ.).
7. Il'inskiy N. F., Moskalenko V. V. Elektroprivod: energo- i resursoberezheniye [Electric drive: saving energy and resource efficiency]. Moscow, 2008. 553 p. (In Russ.).
8. Elovik V. L., Voytov I. V., Sedlukho Yu. P. Raschet i analiz rezhimov raboty tsentrobezhnykh nasosov s chastotno-reguliruyemym elektroprivodom [Calculation and analysis of centrifugal pumps with variable speed drive]. Minsk, 2022. 110 p. ISBN 978-985-897-023-9. EDN NXDWTG. (In Russ.).
9. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines // *IEE Proceedings — Electric Power Applications*. 1997. Vol. 144, Issue 2. P. 101–109. DOI: 10.1049/ip-epa:19970781. (In Engl.).

10. German-Galkin S. G. Matlab & Simulink. Proektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg, 2011. 368 p. ISBN 978-5-7931-0884-3. (In Russ.).

11. Karassic I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Pump Handbook. 3rd ed. McGRAW-HILL New, 2001. 1790 p. ISBN 0-07-034032-3. (In Engl.).

12. Khabarov S. P., Shilkina M. L. Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh sistem. Sreda Simintech [Fundamentals of technical system modelling. Simintech environment]. St. Petersburg, 2019. 120 p. ISBN 978-5-8114-3526-5. EDN NTKPGG. (In Russ.).

LYSENKO Oleg Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Russia), Associate Professor of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4975-9193

AuthorID (RSCI): 643928

ORCID: 0000-0002-7924-5494

AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ResearcherID: N-5528-2015

Correspondence address: deolas@mail.ru

For citations

Lysenko O. A. Determination of the influence of hydraulic load of centrifugal pump on coordinates of asynchronous frequency-controlled electric drive // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 84–91. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-84-91.

Received April 22, 2023.

© O. A. Lysenko

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЕЙ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

При коротких замыканиях выбор поврежденных фаз всегда предшествует определению места повреждения. Для выбора поврежденной фазы широко используются фильтровые избиратели поврежденной фазы, использующие симметричные составляющие фазных токов. В сетях с изолированной нейтралью фазные токи при замыкании на землю определяются в основном токами нагрузки, и в большинстве случаев фазный ток поврежденной фазы мало отличается от токов в неповрежденных фазах. Поэтому фазные токи и их симметричные составляющие для выбора поврежденной фазы при однофазных замыканиях не используются. Для выбора поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью используются свойства модулей фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали. Однофазные замыкания на землю происходят, как правило, через переходные сопротивления, значения которых могут достигать несколько тысяч Ом. Поэтому исследование избирателей поврежденной фазы, использующих модули напряжений, при однофазных замыканиях и при замыканиях через значительные переходные сопротивления, является актуальной задачей.

Цель статьи — исследовать свойства и рассмотреть направления совершенствования избирателей поврежденной фазы, использующих модули фазных напряжений, определить области их селективного действия в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания. Описать алгоритмы, при которых избиратель будет действовать селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, избиратели поврежденной фазы, переходное сопротивление.

Введение. В сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ избиратели поврежденной фазы (ИПФ) при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) используются совместно с устройствами контроля изоляции [1] и устройствами по определению места замыкания по параметрам аварийного режима [2, 3]. Поврежденная фаза при контроле изоляции определяется, как правило, по трем вольтметрам, включенным во вторичную обмотку трансформатора напряжения. В электрических сетях карьеров, угольных разрезов и шахт с изолированной нейтралью выбор поврежденной фазы при ОЗЗ используется для защитного шунтирования поврежденной фазы и для гашения дуги в месте замыкания. Такое шунтирование применяется с целью обеспечения электробезопасности путем снижения тока, протекающего через тело человека, попавшего под напряжение [4]. При возникновении замыкания ИПФ определяет поврежденную фазу. Поврежденная фаза заземляется на небольшой промежуток времени и затем дешунтируется. За время шунтирования дуга в месте замыкания гаснет, а в случае прикосновения человека к токоведущей части до шунтирования он успевает за время шунтирования освободиться от прикосновения. В некоторых стра-

нах защитное шунтирование применяется и в сетях напряжением 6,10 кВ [5].

При коротких замыканиях выбор поврежденных фаз всегда предшествует реализации функции определения места повреждения, в том числе и при использовании технологий современных «цифровых» электрических сетей [6, 7]. В сетях напряжением 110 кВ избиратели используются для выбора поврежденных фаз при несимметричных коротких замыканиях [8–10]. Для выбора поврежденной фазы широко используются фильтровые ИПФ, использующие симметричные составляющие фазных токов [11–13]. При однофазных коротких замыканиях векторы симметричных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей в поврежденной фазе совпадают по направлению и угол между их векторами равен нулю, в то время как в неповрежденных фазах вектор тока нулевой последовательности составляет с векторами токов обратной последовательности углы 120° или 240° [13–15]. Таким же свойством обладают векторы токов обратной и нулевой последовательностей в поврежденной фазе при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью [16]. От фазных токов нагрузки аварийные составляющие обратной и нулевой

последовательности не зависят, поэтому и работа фильтровых ИПФ не зависит от токов нагрузки. Это главное достоинство фильтровых избирателей. Другим достоинством использования симметричных составляющих токов является независимость условий срабатывания фильтровых ИПФ от переходных сопротивлений в месте повреждения. Однако в сетях с изолированной нейтралью фазные токи при замыкании на землю определяются в основном токами нагрузки, и в большинстве случаев фазный ток поврежденной фазы мало отличается от токов в неповрежденных фазах. Поэтому фазные токи и их симметричные составляющие для выбора поврежденной фазы при ОЗЗ не используются. Для выбора поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью используются свойства фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали.

В статье рассмотрены алгоритмы избирателей поврежденной фазы, основанные на использовании действующих значений (модулей) фазных напряжений. Выполнен аналитический обзор избирателей, предложены пути их совершенствования, определены области селективного действия в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания.

Метод исследования. Для исследования ИПФ используются графики изменения фазных напряжений в функции переходного сопротивления. Переходное сопротивление при ОЗЗ может достигать нескольких тысяч Ом, поэтому графики строят либо в логарифмическом масштабе [17], либо вводится промежуточная переменная, зависящая от переходного сопротивления. В качестве такой переменной в [18] принят угол α , на который напряжение нейтрали относительно земли U_{N3} отстает от напряжения поврежденной фазы относительно нейтрали U_{AN} , взятого с противоположным знаком. Графики изменения фазных напряжений $U_{A'}$, $U_{B'}$, $U_{C'}$ и смещения нейтрали U_N в функции угла α в относительных единицах приведены на рис. 1. Для исследования алгоритмов избирателей поврежденной фазы была реализована модель сети и устройств, реализующих эти алгоритмы в программном комплексе MATLAB Simulink.

Графики на рис. 1 построены в относительных единицах для отношений фазных напряжений при ОЗЗ к фазному напряжению в нормальном рабочем режиме U_ϕ . В нормальном режиме, когда $\alpha = 90^\circ$, все фазные напряжения на рис. 1 равны единице. При металлическом замыкании (при $R_{\Gamma} = 0$ и $\alpha = 0^\circ$) напряжение поврежденной фазы снижается до нуля, а напряжения неповрежденных фаз увеличиваются в 1,73 раза.

Угол α зависит от величины переходного сопротивления. Поэтому на ось углов α на рис. 1 нанесена ось переходных сопротивлений R_{Γ} . На рис. 1 отмечены три значения переходного сопротивления $R_{\Gamma1}$, $R_{\Gamma2}$ и $R_{\Gamma3}$, важные для анализа алгоритмов ИПФ. При сопротивлении $R_{\Gamma2}$ напряжение неповрежденной фазы B (U_B на рис. 1) снижается до значения напряжения поврежденной фазы (фазы A). В точке пересечения графиков напряжений U_A и U_B фазные напряжения равны между собой и равны 0,87. При сопротивлении $R_{\Gamma3}$ напряжение неповрежденной фазы « B » достигает минимально возможного значения и при дальнейшем росте переходного сопротивления напряжение неповрежденной фазы « B » начинает увеличиваться. Минимально возможное значение напряжения неповрежденной фазы равно 0,82. При переходном сопротивлении $R_{\Gamma1}$ напряже-

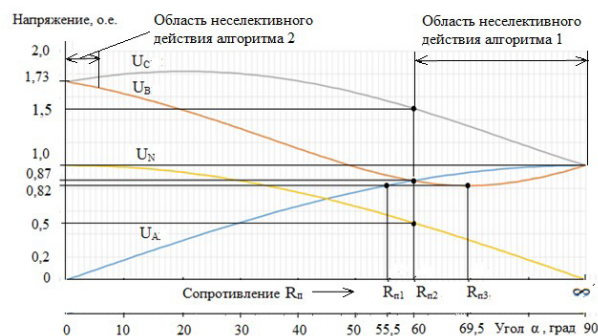


Рис. 1. Графики изменения напряжений в функции переходного сопротивления

ние поврежденной фазы A снижается до минимально возможного значения неповрежденной фазы B , равного 0,82. Значения переходных сопротивлений $R_{\Gamma1}$, $R_{\Gamma2}$ и $R_{\Gamma3}$ зависят от величины тока замыкания на землю. Так, в сети 10 кВ сопротивление $R_{\Gamma2}$ может быть от нескольких сотен Ом при токе замыкания 10 А до нескольких тысяч Ом при токе 1 А [18]. Так как при замыкании на землю через деревянные части конструкции или при падении провода на сухой грунт переходные сопротивления могут быть до 5–7 кОм [19], то при анализе ИПФ необходимо учитывать ОЗЗ через сопротивления $R_{\Gamma1}$, $R_{\Gamma2}$ и $R_{\Gamma3}$.

Способы выбора поврежденной фазы и их анализ. В основе алгоритмов выбора поврежденной фазы при использовании модулей напряжений лежат два признака поврежденной фазы: поврежденной является фаза с наименьшим значением фазного напряжения, и поврежденной является фаза, отстающая от фазы с наибольшим значением фазного напряжения. Критерий выбора поврежденной фазы по наименьшему из фазных напряжений с использованием математических символов при замыкании на землю фазы A записывается в виде:

$$U_A = U_{\min} \in U_\phi \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_A. \quad (1)$$

Критерий (1) означает: если напряжение U_A является наименьшим из фазных напряжений U_ϕ , то выходным напряжением ИПФ является напряжение U_A и поврежденной является фаза A .

При замыкании на землю фазы A наибольшее напряжение будет у фазы C . При этом критерий выбора поврежденной фазы по наибольшему из фазных напряжений с использованием математических символов записывается в виде:

$$U_C = U_{\max} \in U_\phi \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_A. \quad (2)$$

Критерий (2) означает: если напряжение U_C является наибольшим из фазных напряжений U_ϕ , то выходным напряжением ИПФ является напряжение U_A отстающей фазы и поврежденной является фаза A [20].

Как следует из рис. 1, избиратель с алгоритмом (1) селективно работает при переходных сопротивлениях от нуля до значения $R_{\Gamma2}$. При ОЗЗ через переходное сопротивление больше значения $R_{\Gamma2}$ наименьшим из фазных напряжений становится напряжение неповрежденной фазы, отстающей по отношению к поврежденной, и ИПФ с алгоритмом (1) теряет селективность. То есть ИПФ с алгоритмом (1) имеет ограниченную чувствительность к замыканию на землю через переходное сопротивление.

В соответствии с рис. 1 при замыкании на землю фазы А наибольшее фазное напряжение будет в фазе С при всех возможных значениях переходного сопротивления. Однако при металлическом замыкании фазные напряжения двух неповрежденных фаз равны между собой и ИПФ с алгоритмом (2) теряет селективность, так как может выбрать отстающую неповрежденную фазу вместо опережающей.

Таким образом, алгоритмы (1) и (2) не могут обеспечить селективный выбор поврежденной фазы во всем диапазоне изменения переходных сопротивлений. Одно из направлений улучшения свойств ИПФ, основанных на свойствах модулей фазных напряжений, — использовать в алгоритме не одно фазное напряжение, а два или все три. Другое направление совершенствования ИПФ — совместное использование алгоритмов (1) и (2), объединенных дополнительными условиями. Рассмотрим оба направления совершенствования ИПФ.

Для повышения селективности и чувствительности к ОЗЗ через переходное сопротивление избирателей с алгоритмом (1) в [21] было предложено использовать векторную разность фазного напряжения относительно нейтрали U_{AN} и напряжения смещения нейтрали U_{N3} . Для измерения фазного напряжения относительно нейтрали используется искусственно созданная нулевая точка. Для исполнительного органа фазы А разность напряжений записывается в виде:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N3}. \quad (3)$$

Исполнительный орган выбирает наибольшее из разностных напряжений, записанных по (3) для фаз А, В и С. Векторные диаграммы выходных напряжений ИПФ U_{A0} , U_{B0} и U_{C0} для фаз А, В и С по выражению (3) приведены на рис. 2. С использованием математических символов критерий выбора поврежденной фазы при использовании разности фазных напряжений $U_{\phi 0}$ записывается в виде:

$$|\dot{U}_{A0}| = U_{max} \in U_{\phi 0} \Rightarrow U_{ввх} = U_{A0}. \quad (4)$$

Критерий по выражению (4) означает: если напряжение U_{A0} является наибольшим из разностных напряжений U_{A0} , U_{B0} и U_{C0} , входящих во множество $U_{\phi 0}$, то выходным напряжением устройства является напряжение U_{A0} и поврежденной является фаза А.

При малых переходных сопротивлениях разностное напряжение U_{A0} поврежденной фазы А по (3) наибольшее. Однако при замыкании на землю через переходное сопротивление, равное граничному значению $R_{П2'}$, разностное напряжение U_{A0} для поврежденной фазы А становится равным разностному напряжению U_{B0} для отстающей фазы В (рис. 2б). А при переходных сопротивлениях больше значения $R_{П2'}$, напряжение U_{B0} становится больше напряжения U_{A0} и в качестве поврежденной будет выбрана неповрежденная фаза В. То есть алгоритм (4) имеет тот же недостаток, что и алгоритм (1). Другим недостатком ИПФ по алгоритму (4) является необходимость создания искусственной нулевой точки (нейтрали).

Для обеспечения селективности ИПФ по алгоритму (2) при металлических замыканиях в [22] было предложено использовать разность действующих значений двух фазных напряжений. Для этого из фазного напряжения одной из фаз вычитается

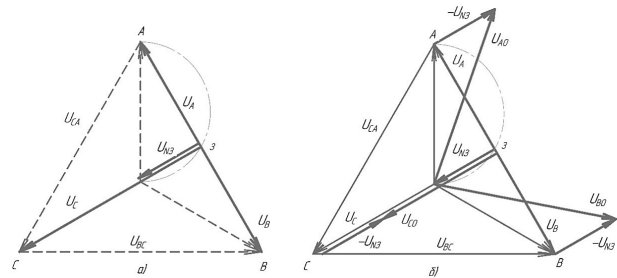


Рис. 2. Векторные диаграммы при $R_{П} = R_{П2}$ для фазных напряжений (а) и напряжений по уравнению (3) (б)

напряжение отстающей фазы. Всего составляются три разности: $U_C - U_A$, $U_A - U_B$ и $U_B - U_C$. В случае замыкания на землю фазы А рабочей является разность:

$$\Delta U(A) = U_C - U_A > 0, \quad (5)$$

где U_A — напряжение замкнувшейся фазы; U_C — напряжение на опережающей по отношению к ней фазе.

Для фазы В рабочей является разность $\Delta U(B) = U_A - U_B$ и для фазы С разность $\Delta U(C) = U_B - U_C$. Исполнительный орган фазы А срабатывает при положительной разнице напряжений по (5). С использованием математических символов критерий выбора поврежденной фазы при замыкании на землю фазы А записывается в виде:

$$\Delta U(A) \in \Delta U(\Phi) > 0 \Rightarrow U_{ввх} = \Delta U(A). \quad (6)$$

Критерий (6) означает: если напряжение $\Delta U(A)$ в множестве разностных напряжений $\Delta U(\Phi)$ является положительным, то выходным напряжением устройства является напряжение $\Delta U(A)$ и поврежденной является фаза А.

Однако ИПФ по (6) также имеет ограниченную чувствительность к переходным сопротивлениям. Из рис. 1 видно, что при замыкании на землю фазы А разностное напряжение $\Delta U(A)$ по (5) положительное и положительный сигнал на выходе ИПФ присутствует при любом переходном сопротивлении, в том числе и при металлическом замыкании. Однако при переходном сопротивлении больше значения $R_{П2'}$, напряжение на поврежденной фазе А становится больше напряжения на отстающей фазе В и положительным становится также разностное напряжение фазы В:

$$\Delta U(B) = U_A - U_B > 0.$$

При этом избиратель по (6) вместо поврежденной фазы А может выбрать неповрежденную фазу В и, значит, теряет селективность.

Таким образом, замыкания на землю фазы А через большое переходное сопротивление ведут к ложному срабатыванию ИПФ по алгоритмам (1), (4) и (6) в неповрежденной фазе В. При этом чувствительность всех трех видов ИПФ ограничивается условием несрабатывания на последующей (здоровой) фазе. Область селективной работы всех трех видов избирателей ограничивается значением переходного сопротивления в диапазоне от нуля до $R_{П2'}$.

Рассмотрим алгоритм выбора поврежденной фазы, способный работать в более широком диапазоне переходных сопротивлений.

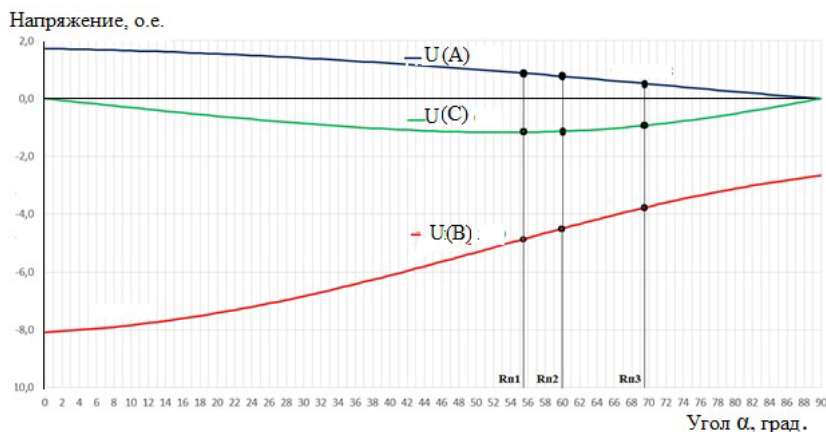


Рис. 3. Графики напряжений по (9) при замыкании на землю фазы А

В [23] был предложен критерий выбора поврежденной фазы для устройств защитного шунтирования, основанный на использовании разности напряжения опережающей фазы и суммы напряжения нулевой последовательности с напряжениями двух других фаз.

Уравнения для выходных напряжений ИПФ записываются в виде:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}(A) &= K_1 U_C - (K_2 U_A + K_3 U_B + K_4 U_0); \\ U_{\text{ВЫХ}}(B) &= K_1 U_A - (K_2 U_B + K_3 U_C + K_4 U_0); \\ U_{\text{ВЫХ}}(C) &= K_1 U_B - (K_2 U_C + K_3 U_A + K_4 U_0), \end{aligned} \quad (7)$$

где U_A, U_B, U_C — модули напряжений фаз А, В и С; U_0 — модуль напряжения нулевой последовательности; K_1, K_2, K_3 и K_4 — коэффициенты, пропорциональности.

Коэффициенты $K_1 - K_4$ выбираются так, чтобы выходное напряжение было больше напряжения срабатывания на выходе избирателя только той фазы, в которой произошло замыкание на землю. При этом условие срабатывания ИПФ можно записать в виде:

$$U(A) \in U(\Phi) > U_{\text{CP}} \Rightarrow U_{\text{ВЫХ}} = U(A), \quad (8)$$

где U_{CP} — напряжение срабатывания.

Выходное напряжение для двух других (неповрежденных) фаз должно быть меньше напряжения срабатывания. Коэффициенты $K_1 - K_4$ определяются из уравнений (7), записанных для режимов работы электрической сети, в которых известны значения фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности.

Коэффициенты могут быть подобраны так, что ИПФ с алгоритмом (8) будет охватывать весь диапазон переходных сопротивлений и чувствительность ИПФ будет ограничена только значением напряжения срабатывания. При коэффициентах по [24]

$$K_1 = 5/3; K_2 = 4/3; K_3 = 1/3; K_4 = \sqrt{3}/3.$$

Выражения (7) для выходных напряжений ИПФ преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} U(A) &= (5/3)U_C - (4/3)U_A - (1/3)U_B - (\sqrt{3}/3)U_0; \\ U(B) &= (5/3)U_A - (4/3)U_B - (1/3)U_C - (\sqrt{3}/3)U_0; \\ U(C) &= (5/3)U_B - (4/3)U_C - (1/3)U_A - (\sqrt{3}/3)U_0. \end{aligned} \quad (9)$$

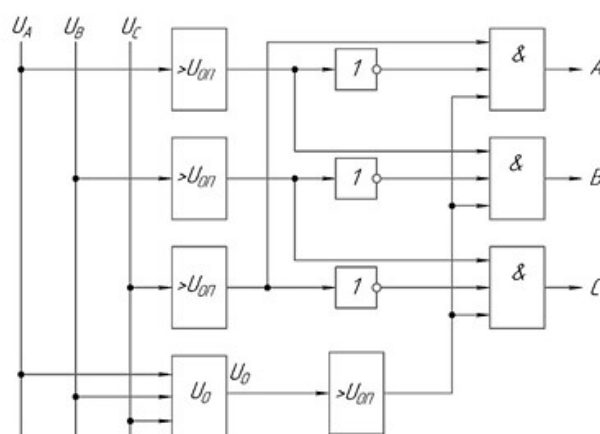


Рис. 4. Структурная схема ИПФ с объединением двух алгоритмов

Графики выходных напряжений по (9) приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что выходное напряжение $U(A)$ поврежденной фазы при любом значении переходного сопротивления больше нуля и при напряжении срабатывания $U_{\text{CP}} = 0$ ИПФ с уравнениями выходных напряжений по (9) будет селективно работать во всем диапазоне переходных сопротивлений.

Другое направление улучшения свойств ИПФ, основанное на свойствах модулей фазных напряжений, — совместное использование алгоритмов (1) и (2). На рис. 1 показаны области неселективного действия алгоритмов (1) и (2). Область неселективного действия алгоритма (1) — это ОЗЗ через переходное сопротивление больше граничного значения $R_{\text{ПЗ}}$. Область селективного действия алгоритма (2) — это область при малых значениях переходного сопротивления, при которых два наибольших фазных напряжения близки к 1,73. Но объединить алгоритмы (1) и (2) через логическую схему «ИЛИ» нельзя, так как в этом случае сохраняются области неселективного действия каждого из алгоритмов. Для улучшения свойств ИПФ, основанных на объединении алгоритмов (1) и (2), необходимо использовать дополнительные условия, блокирующие работу каждого из алгоритмов в области, где возможна потеря их селективности. Запрет работы алгоритма (2) в области малых переходных сопротивлений может быть выполнен от блока измерения фазных напря-

жений [25, 26]. Для этого вместо определения фазы с наибольшим и фазы с наименьшим фазным напряжением определяются фазы, в которых фазное напряжение больше опорного напряжения, и фазы, в которых напряжение меньше опорного. Структурная схема, поясняющая принцип блокировки в таком ИПФ, приведена на рис. 4. Каждое из фазных напряжений в блоке сравнения сравнивается с опорным напряжением $U_{оп}$, в качестве которого может быть принято фазное напряжение предаварийного режима. Если фазное напряжение одной или двух неповрежденных фаз больше опорного, то на выходе соответствующего блока сравнения формируется единичный сигнал, который поступает на вход логической схемы «И» отстающей фазы. Если отстающая фаза является поврежденной, то ее напряжение меньше опорного и на выходе схемы «НЕ» и входе схемы «И» этой фазы отсутствует запрещающий сигнал. При этом в случае наличия единичного сигнала на выходе блока сравнения напряжения нулевой последовательности с опорным напряжением ИПФ срабатывает и правильно определяет поврежденную фазу. Если же отстающая фаза является неповрежденной, то на выходе ее блока сравнения сигнала нет и на выходе схемы «НЕ» формируется сигнал запрета, который блокирует работу выходной схемы «И». Такой ИПФ работает селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление, в том числе и при значениях RP_1 , RP_2 и RP_3 .

Блокирование работы алгоритмов (1) или (2) в области, где возможна потеря их селективности, можно выполнять с помощью дополнительных условий. Для формирования дополнительных условий можно использовать либо значение напряжения фазы с наименьшим фазным напряжением, либо значение напряжения фазы с наибольшим фазным напряжением, либо значение напряжения нулевой последовательности [18, 27]. При использовании минимально возможного фазного напряжения неповрежденной фазы в алгоритм (1) вводится условие: напряжение фазы с наименьшим значением фазного напряжения должно быть меньше минимально возможного напряжения неповрежденной фазы:

$$U_{\phi, \min} < UR_{пл}, \quad (10)$$

где $U_{\phi, \min}$ — наименьшее из фазных напряжений; $UR_{пл}$ — минимально возможное фазное напряжение неповрежденной фазы.

Таблица 1

Параметры сети

Параметры сети	Модель
Номинальное напряжение, кВ	6
Тип линий	Кабельные
Суммарная протяженность линий сети, км	40
Протяженность испытываемой линии, км	5
Суммарный емкостный ток сети, А	19,4

Минимально возможное напряжение неповрежденной фазы имеет место при переходном сопротивлении RP_3 и равно 0,82 (рис. 1). Поэтому если для фазы с наименьшим напряжением выполняется условие (10), то это может быть только поврежденная фаза. Таким образом, если выполняется условие (10), то поврежденная фаза выбирается по алгоритму (1). Если условие (10) не выполняется, то должен действовать алгоритм (2).

Использование для дополнительных условий напряжения фазы с наибольшим фазным напряжением или напряжения нулевой последовательности основано на том, что алгоритм (1) действует селективно при переходных сопротивлениях меньше RP_2 . Из рис. 1 видно, что при переходном сопротивлении RP_2 напряжение нулевой последовательности равно 0,5, а напряжение фазы с наибольшим фазным напряжением равно 1,5. Следовательно, если напряжение нулевой последовательности больше 0,5 или напряжение фазы с наибольшим фазным напряжением больше 1,5, то алгоритм (1) действует селективно. При этом для обеспечения селективности алгоритма (1) в условия срабатывания ИПФ достаточно ввести одно из условий:

$$U_{\phi, \max} > 1,5, \quad (11)$$

$$U_0 > 0,5, \quad (12)$$

где $U_{\phi, \max}$ — напряжения фазы с наибольшим фазным напряжением; U_0 — напряжение нулевой последовательности.

Если выполняется условие (11) или (12), то поврежденная фаза выбирается по алгоритму (1). Если условия (11) или (12) не выполняются, то действие алгоритма 1 запрещается и должен действовать алгоритм (2).

Таблица 2

Электрические параметры сети при испытаниях

№	Расстояние до ОЗЗ, км	$R_{пер}$, Ом	$U_{A'}$, В	$U_{B'}$, В	$U_{C'}$, В	$U_{N'}$, В	Поврежденная фаза
1	0	0	0	$6306e^{-j151c}$	$6306e^{j149c}$	$3642e^{j179c}$	А
2	0	200	$2660e^{j41c}$	$3749e^{-j160c}$	$6060e^{j124c}$	$2459e^{j132c}$	А
3	2,5	316	$3151e^{j28c}$	$3151e^{-j151c}$	$5433e^{j119c}$	$1794e^{j119c}$	А
4	2,5	350	$3225e^{j26c}$	$3085e^{-j148c}$	$5298e^{j118c}$	$1660e^{j116c}$	А
5	5	307	$3151e^{j28c}$	$3151e^{-j151c}$	$5434e^{j119c}$	$1794e^{j119c}$	А
6	5	310	$3157e^{j28c}$	$3144e^{-j151c}$	$5423e^{j119c}$	$1783e^{j194c}$	А

Результаты исследования алгоритмов ИПФ

№	Результаты работы алгоритмов ИПФ.						
	ИПФ по (1)	ИПФ по (2)	ИПФ по (4)	ИПФ по (6)	ИПФ по (8)	ИПФ по рис. 4	ИПФ по (10–12)
1	А	Отказ	А	А	А	А	А
2	А	А	А	А	А	А	А
3	Отказ	А	Отказ	А	А	А	А
4	В	А	В	Отказ	А	А	А
5	Отказ	А	Отказ	А	А	А	А
6	В	А	В	Отказ	А	А	А

Таким образом, при использовании любого из условий (10), (11) или (12) совместно с алгоритмами (1) и (2) избиратель будет действовать селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

Исследование работы алгоритмов. Для оценки работы алгоритмов определения поврежденной фазы была разработана модель электрической сети с изолированной нейтралью в программном комплексе Matlab Simulink, параметры которой приведены в табл. 1.

В табл. 2 представлены комплексы фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали, полученные на модели при замыканиях в начале, середине и конце контролируемой линии при замыкании в фазе «А».

Результаты исследования алгоритмов ИПФ на модели сети представлены в табл. 3.

Алгоритмы по (1) и (4) правильно выбрали поврежденную фазу «А» только в тех случаях, когда переходное сопротивление было меньше значения $R_{\text{пл}}$ и модуль фазного напряжения поврежденной фазы был наименьшим. При испытаниях 3 и 5, алгоритмы, в соответствии с теоретическим анализом, отказали, а при испытаниях 4 и 6 ошибочно выбрали фазу «В» вместо фазы «А». Алгоритм по (2) отказал при металлическом замыкании в начале линии, когда напряжения в неповрежденных фазах были равны (испытание 1). В остальных случаях работа алгоритма по (2) была селективной. Алгоритм по (6) отказал при испытаниях 4 и 6, когда разность модулей напряжений по (5) оказалась положительной для двух разностей фазных напряжений.

Наилучшие результаты показали алгоритмы по (8), по рис. 4 и по (10–12), которые действовали селективно при всех испытаниях.

Заключение. Выполнен аналитический обзор избирателей поврежденной фазы при однофазных замыканиях на землю, основанных на свойствах модулей фазных напряжений. Для анализа предложено использовать математическое описание алгоритмов ИПФ в обобщенном виде. Исследованы области селективного действия избирателей в зависимости от величины переходного сопротивления в месте замыкания.

Исследованы алгоритмы, основанные на использовании наименьшего из фазных напряжений (алгоритм 1) или наибольшего из фазных напряжений (алгоритм 2). Показано, что такие алгоритмы, а также алгоритмы, основанные на контроле разности двух фазных напряжений или разности фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали, в зависимости от значения переходного сопротивления могут работать неселективно.

Исследованы критерии выбора поврежденной фазы, основанные на использовании трех уравнений, записанных для выходных напряжений разных фаз. Выходное напряжение такого избирателя должно быть больше напряжения срабатывания в уравнении только той фазы, в которой произошло замыкание на землю. Показано, что такой избиратель может селективно работать во всем диапазоне переходных сопротивлений, но требует исследований для выбора коэффициентов в уравнениях для выходных напряжений.

Предложены направления совершенствования избирателей поврежденной фазы, основанных на совместном использовании алгоритмов 1 и 2. Описаны алгоритмы, при которых избиратель будет действовать селективно как при металлических замыканиях, так и при замыканиях через переходное сопротивление.

Библиографический список

1. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Москва: Высшая школа, 2007. 639 с.
2. Аржанников Е. А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 175 с.
3. Шабанов В. А., Сорокин А. В. Алгоритмы дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания с использованием тока нулевой последовательности в качестве опорного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1, т. 17. С. 33–43. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-33-43.
4. Шуцкий В. И., Жидков В. О., Ильин Ю. Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 150 с.
5. Гуревич В. И. Некоторые технические аспекты проблемы защиты от замыканий на землю распределительных сетей среднего напряжения // Промышленная энергетика. 2001. № 1. С. 34–37.
6. Мухлынин Н. Д., Ерохин П. М., Паздерин А. В. Направления совершенствования функций релейной защиты за счет использования технологий синхронизированных векторных измерений // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3 (56). С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11.
7. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks // 2021 IEEE Madrid PowerTech. Madrid, Spain. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755.
8. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита. Москва: Высшая школа, 1978. 215 с.
9. Nuthalapati B., Sinha U. K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14 (2). P. 483–489.

10. Yang Yu, Mengshi Li, Tianyao Ji [et al.]. Fault Location Approach for Distribution Network with Dynamic Environment // International Transactions on Electrical Energy System. 2022. Vol. 99. DOI: 10.1155/2022/3065602.
11. Лосев С. Б., Онучин В. А., Плотников В. Г. Фильтровый избирательный орган, реагирующий на соотношение аварийных значений симметричных составляющих // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1988. № 10. С. 57–64.
12. Кочетов И. Д., Лямец Ю. Я., Мартынов М. В. [и др.]. Индивидуальная и групповая распознающая способность измерительных органов релейной защиты // Электрические станции. 2019. № 10 (1059). С. 30–35.
13. Dashtdar M., Dashtda M. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU) // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2019. Vol. 19 (2). P. 38–43. DOI: 10.1515/sbeef-2019-0019.
14. Любарский Д. Р., Мисриханов М. Ш., Саухатас А. С. Определение вида повреждения и поврежденных фаз // Вестник ИГЭУ. 2006. Вып. 4. С. 1–3.
15. Кочетов И. Д., Лямец Ю. Я., Маслов А. Н. Распознавание поврежденных фаз и определение места повреждения линии электропередачи при одностороннем наблюдении // Электрические станции. 2022. № 4. С. 48–53. DOI: 10.34831/EP.2022.1089.4.008.
16. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970, 519 с.
17. Кучумов Л., Кузнецов А., Червочков Д. Переходное сопротивление в месте ОЗЗ. Влияние на режимные параметры и рабочие сигналы защит от ОЗЗ // Новости электротехники. 2017. № 4 (106). С. 24–27.
18. Шабанов В. А., Сорокин А. В. Признаки поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 19, № 3-4. С. 89–100. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100.
19. Шалин А. И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php> (дата обращения: 10.02.2023).
20. Пат. SU 1201945A1 СССР, МПК Н 02 Н 5/12. Устройство для автоматического шунтирования поврежденной фазы в электрической сети с изолированной нейтралью // Рыбальченко Ю. Я., Сантоцкий В. Г., Стасенко Р. Ф. № 3773606; заявл. 23. 07.84; опубл. 30. 12.85. Бюл. № 48.
21. Пат. SU 335763 СССР, МПК Н 02 Н 3/16. Устройство для определения поврежденной фазы / Микрюков В. И., Шишкин Н. Ф., Шкабер В. В. [и др.]. № 1487097/24-76; заявл. 29. 10.70; опубл. 11. 04.72. Бюл. № 13.
22. Пат. SU 904074 A1 СССР, МПК Н 02 Н 5/12; Н 02 Н 3/16. Устройство для определения поврежденной фазы сети // Антонов В. Ф., Сирота И. М., Назаров В. В. [и др.]. № 2733799; заявл. 07. 03.79; опубл. 07. 02.82. Бюл. № 5.
23. Пат. SU 964554 СССР, МПК G 01 R 31/08; H 02 H 3/16. Способ определения поврежденной фазы в электрической сети с изолированной нейтралью // Антонов В. Ф., Ягудаев Б. М., Назаров В. В., Микрюков В. И. [и др.]. № 3256524; заявл. 09. 13.81; опубл. 07. 10.82. Бюл. № 37.
24. Шабанов В. А. Избиратель поврежденной фазы при замыканиях на землю на основе системы уравнений для модулей напряжений // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. VII Международ. науч.-техн. конф. Уфа: Изд-во ООО Научно-инженерный центр Энергодиагностика, 2023. С. 128–135.
25. Пат. SU 469182A1 СССР, МПК Н 02 Н 3/16. Устройство для защиты от поражения электрическим током в трехфазных сетях с изолированной нейтралью // Коваленко И. И. № 175041524-7; заявл. 22. 02.72; опубл. 30. 04.75. Бюл. № 18.
26. Пат. SU 589659A1 СССР, МПК G 01 R 31/08; H 02 H 3/16. Способ распознавания поврежденной фазы в сетях с компенсацией токов однофазного замыкания // Стасенко Р. Ф., Фельдман Н. М., Шишков И. М. № 2037745; заявл. 02. 07.74; опубл. 25. 01.78. Бюл. № 3.
27. Сорокин А. В., Шабанов В. А. Алгоритм определения поврежденной фазы при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 2. С. 52–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62.

ШАБАНОВ Виталий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ), г. Уфа.

SPIN-код: 6677-1136

AuthorID (РИНЦ): 592405

Адрес для переписки: vitaliyy123@yandex.ru

СОРОКИН Александр Владимирович, аспирант кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» УГНТУ, г. Уфа.

SPIN-код: 5320-8188

AuthorID (РИНЦ): 860832

Адрес для переписки: sorokin-a-v@mail.ru

Для цитирования

Шабанов В. А., Сорокин А. В. Использование модулей фазных напряжений для выбора поврежденной фазы при замыканиях на землю // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 92–100. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-92-100.

Статья поступила в редакцию 14.03.2023 г.

© В. А. Шабанов, А. В. Сорокин

THE USE OF PHASE VOLTAGE MODULES TO SELECT THE DAMAGED PHASE IN CASE OF SINGLE-PHASE EARTH FAULTS

In case of short circuits, the selection of damaged phases always precedes the determination of the damage location. To select the damaged phase, filter selector of the damaged phase are widely used, using symmetrical components of phase currents. In networks with an isolated neutral, the phase currents during a ground fault are determined mainly by load currents and in most cases the phase current of the damaged phase differs little from the currents in the undamaged phases. Therefore, phase currents and their symmetrical components are not used to select the damaged phase in single-phase short circuits. To select the damaged phase in networks with an isolated neutral, the properties of the phase voltage modules and the neutral offset voltage are used. Single-phase earth faults occur, as a rule, through fault resistances, the values of which can reach several thousand ohms. Therefore, the study of devices for selecting the damaged phase using voltage modules with single-phase earth faults through significant fault resistances is an urgent task.

The purpose of the article is to investigate the properties and consider the directions of improvement of damaged phase sensors using phase voltage modules, to determine the areas of their selective action depending on the magnitude of the fault resistance at the point of damage. Describe algorithms in which the voter will act selectively both with metal damages and with damages through fault resistance.

Keywords: single-phase earth faults, device for selecting the damaged phase, fault resistance.

References

1. Andreyev V. A. Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektrosnabzheniya [Relay protection and automation of power supply system's]. Moscow, 2007. 639 p. (In Russ.).
2. Arzhannikov E. A. Distsionnyy printsip v releynoy zashchite i avtomatike liniy pri zamykaniyakh na zemlyu [Remote principle in relay protection and automation of lines during earth faults]. Moscow, 1985. 175 p. (In Russ.).
3. Shabanov V. A., Sorokin A. V. Algoritmy distantsionnogo opredeleniya rasstoyaniya do mesta odnofaznogo zamykaniya s ispol'zovaniyem toka nulevoy posledovatel'nosti v kachestve opornogo toka [Algorithms for remote determination of the distance to the single-phase fault location using the zero-sequence current as the reference current] // *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy. Electrotechnical and Information Complexes and Systems*. 2021. No. 1, vol. 17. P. 33–43. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-33-43. (In Russ.).
4. Shutskiy V. I., Zhidkov V. O., Il'in Yu. N. Zashchitnoye shuntirovaniye odnofaznykh povrezhdeniy elektroustanovok [Protective shunting of single-phase damages of electrical installations]. Moscow, 1988. 150 p. (In Russ.).
5. Gurevich V. I. Nekotoryye tekhnicheskiye aspekty problemy zashchity ot zamykaniy na zemlyu raspredelitel'nykh setey srednego napryazheniya [Some technical aspects of the problem of earth fault protection of medium voltage distribution networks] // *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*, 2001. No. 1. P. 34–37. (In Russ.).
6. Mukhlynin N. D., Yerokhin P. M., Pazderin A. V. Napravleniya sovershenstvovaniya funktsiy releynoy zashchity za schet ispol'zovaniya tekhnologiy sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniy [Relay protection improving by means of using PMU technologies] // *Elektrotekhnicheskiye sistemy i kompleksy. Electrical Systems and Complexes*. 2022. No. 3 (56). P. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-4-11. (In Russ.).
7. Galvez C., Abur A. Fault Location in Meshed and Active Power Distribution Networks // 2021 IEEE Madrid PowerTech. Madrid, Spain. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/PowerTech46648.2021.9494755. (In Engl.).
8. Fabrikant V. L. Distsionnaya zashchita [Remote protection]. Moscow, 1978. 215 p. (In Russ.).
9. Nuthalapati B., Sinha U. K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14 (2). P. 483–489. (In Engl.).
10. Yang Yu, Mengshi Li, Tianyao Ji [et al.]. Fault Location Approach for Distribution Network with Dynamic Environment // *International Transactions on Electrical Energy System*. 2022. Vol. 99. DOI: 10.1155/2022/3065602. (In Engl.).
11. Losev S. B., Onuchin V. A., Plotnikov V. G. Fil'trovyy izbiratel'nyy organ, reagiruyushchiy na sootnosheniye avariynykh znacheniy simmetrichnykh sostavlyayushchikh [Filter elector body reacting to the ratio of emergency values of symmetrical components] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*. 1988. No. 10. P. 57–64. (In Russ.).

12. Kochetov I. D., Lyamets Yu. Ya., Martynov M. V. [et al.]. Individual'naya i gruppovaya raspoznayushchaya sposobnost' izmeritel'nykh organov releynoy zashchity [Individual and group recognition capability of relay protection measurers] // Elektricheskiye stantsii. *Electric Stations*. 2019. No. 10. P. 30–35. (In Russ.).
13. Dashtdar M., Dashtda M. Fault Location in Distribution Network Based on Phasor Measurement Units (PMU) // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2019. Vol 19 (2). P. 38–43. DOI: 10.1515/sbeef-2019-0019. (In Engl.).
14. Lyubarskiy D. R., Misrikhanov M. Sh., Saukhatas A. S. Opredeleniye vida povrezhdeniya i povrezhdennykh faz [Determination of the type of damage and damaged phases] // Vestnik IGEU. *Bulletin ISPEU*. 2006. Issue 4. P. 1–3. (In Russ.).
15. Kochetov I. D., Lyamets Yu. Ya., Maslov A. N. Raspoznavaniye povrezhdennykh faz i opredeleniye mesta povrezhdeniya linii elektroperedachi pri odnostoronnem nablyudeniі [Recognition of damaged phases and fault location of power transmission line observed on one side] // Elektricheskiye stantsii. *Electric Stations*. 2022. No. 4. P. 48–53. DOI: 10.34831/EP.2022.1089.4.008. (In Russ.).
16. Ulyanov S. A. Elektromagnitnyye perekhodnyye protsessy v elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transients in electrical systems]. M.: Energiya, 1970. 519 p. (In Russ.).
17. Kuchumov L., Kuznetsov A., Chervochkov D. Perekhodnoye soprotivleniye v meste OZZ. Vliyaniye na rezhimnyye parametry i rabochiye signaly zashchit ot OZZ [Transient resistance at the site of the OZZ. Influence on the operating parameters and operating signals of protection from OZZ] // Novosti ElektroTehnikii. *Electrical Engineering News*. 2017. No. 4 (106). P. 24–27. (In Russ.).
18. Shabanov V. A., Sorokin A. V. Priznaki povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu [Features of a faulty phase at single phase-to-ground faults] // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekxy i sistemy. *Electrical and Information Complexes and Systems*. 2022. Vol. 19, no. 3-4. P. 89–100. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89-100. (In Russ.).
19. Shalin A. I. Zamykaniya na zemlyu v liniyakh elektroperedachi 6–35 kV. Osobennosti vozniknoveniya i pribory zashchity [Earth faults in 6-35 kV power transmission lines] // Novosti Elektrotekhniki. *Electrical Engineering News*. 2005. No. 1 (31). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/15.php> (accessed: 10.02. 2023). (In Russ.).
20. Patent SU 1201945A1 SSSR, IPC H 02 H 5/12. Ustroystvo dlya avtomaticheskogo shuntirovaniya povrezhdennoy fazy v elektricheskoy seti s izolirovannoy neytral'yu [Device for automatic shutting of faulted phase in isolated neutral system] // Rybalchenko Yu. Ya., Santotskiy V. G., Stasenko R. F. No. 3773606. (In Russ.).
21. Patent SU 335763 SSSR, IPC H 02 H 3/16. Ustroystvo dlya opredeleniya povrezhdennoy fazy [Device for determining the damaged phase] // Mikryukov V. I., Shishkin N. F., Shkaber V. V. [et al.]. No. 1487097/24-7622. (In Russ.).
22. Patent SU 904074 A1 SSSR, IPC H 02 H 5/12; H 02 H 3/16. Ustroystvo dlya opredeleniya povrezhdennoy fazy seti [Device for determining damaged network phase] // Antonov V. F., Sirota I. M., Nazarov V. V. [et al.]. No. 2733799. (In Russ.).
23. Patent SU 964554 SSSR, IPC G 01 R 31/08; H 02 H 3/16. Sposob opredeleniya povrezhdennoy fazy v elektricheskoy seti s izolirovannoy neytral'yu [Method of determining damaged phase in electric network with insulated neutral wire] // Antonov V. F., Yagudayev B. M., Nazarov V. V., Mikryukov V. I. [et al.]. No. 3256524. (In Russ.).
24. Shabanov V. A. Voter of the damaged phase in earth faults based on a system of equations for voltage modules // Electric drive, electrical technologies and electrical equipment of enterprises: collection of scientific tr. VII International Scientific and Technical conf. Ufa: Publishing House of LLC Scientific and Engineering Center Energodiagnostika, 2023. P. 128–135. (In Russ.).
25. Patent SU 469182A1 SSSR, IPC. H 02 H 3/16. Ustroystvo dlya zashchity ot porazheniya elektricheskim tokom v trekhfaznykh setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Device for protection against electric shock in three-phase networks with insulated neutral] // Kovalenko I. I. No. 175041524-7. (In Russ.).
26. Patent SU 589659A1 SSSR, IPC G 01 R 31/08; H 02 H 3/16. Sposob raspoznavaniya povrezhdennoy fazy v setyakh s kompensatsiyey tokov odnofaznogo zamykaniya [A method for recognizing a damaged phase in networks with compensation of single-phase short-circuit currents] // Stasenko R. F., Fel'dman N. M., Shishkov I. M. No. 2037745. (In Russ.).
27. Sorokin A. V., Shabanov V. A. Algoritm opredeleniya povrezhdennoy fazy pri odnofaznom zamykanii na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Algorithm for determining the damaged phase during a single-phase earth fault in networks with an isolated neutral] // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekxy i sistemy. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2022. Vol. 18, no. 2. P. 52–62. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-52-62. (In Russ.).

SHABANOV Vitaliy Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, Ufa State Petroleum Technical University (USPTU), Ufa.

SPIN-code: 6677-1136

AuthorID (RSCI): 592405

Correspondence address: vitaliy123@yandex.ru

SOROKIN Aleksandr Vladimirovich, Graduate Student of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Department, USPTU, Ufa.

SPIN-code: 5320-8188

AuthorID (RSCI): 860832

Correspondence address: sorokin-a-v@mail.ru

For citations

Shabanov V. A., Sorokin A. V. The use of phase voltage modules to select the damaged phase in case of single-phase earth faults // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 92–100. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-92-100.

Received March 14, 2023.

© V. A. Shabanov, A. V. Sorokin

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

В данной статье предметом исследования являются методы расчета потерь активной мощности в воздушных линиях электроэнергетики при учете температурной зависимости активных сопротивлений. Предложен и подробно обоснован аналитический подход, основанный на методе Феррари для расчета температуры провода и потерь активной мощности в условиях вынужденной конвекции. Особенностью подхода является универсальность, выражающаяся в том, что разработанная математическая модель позволяет с единых позиций рассматривать неизолированные и изолированные провода в воздушных линиях электропередачи. Приведены результаты расчета температуры и потерь активной мощности предложенным методом, методом наименьших квадратов и итерационным методом. Отмечена высокая точность совпадения результатов, полученных различными методами.

Ключевые слова: температура провода, уравнение теплового баланса, вынужденная конвекция, температурная зависимость сопротивления, потери активной мощности, воздушные линии электропередачи.

Введение. Спрос на электрическую энергию в мире постоянно растет. Согласно прогнозу, представленному в международном обзоре энергии World Energy Outlook 2020 рост электрической генерации с 2019 по 2040 год оценивается значением 1,9 процента в год. По этому сценарию доля электроэнергии в общем объеме потребления энергии должна возрасти с 19 % в 2018 году до 24 % в 2040 году. В качестве подтверждения в табл. 1, на рис. 1 и на рис. 2 представлена информация по производству электроэнергии [1, 2] в различных регионах и в целом в мире.

Постоянный рост производства электроэнергии связан с ростом населения, которое по данным World Energy Outlook 2022 возрастет к 2050 году на 2 миллиарда человек [3].

Исключение постоянному росту производства электроэнергии представляет 2020 год. Из-за кризиса, вызванного пандемией COVID-19, снижение производства в 2020 году привело к снижению спроса на электроэнергию. Как следует из рис. 2, это первый спад с 2011 года.

В условиях ежегодного роста спроса на электроэнергию необходимо строительство новых линий электропередачи и проведение исследований по изучению подходов для повышения пропускной способности уже существующих линий электропередачи. Однако внедрение новых линий ограничено по целому ряду аспектов:

- возможности постройки;
- высокой стоимости;
- временным затратам.

По этой причине очень важны проводимые исследования по изучению увеличения пропускной способности уже эксплуатируемых линий электропередачи. К таким исследованиям следует в первую очередь отнести вопросы замены старых проводников на высокотемпературные [4–6], проблемы теплового нагрева линий электропередачи и максимально допустимое провисание проводника [7, 8].

Чрезвычайно важным вопросом является расчет потерь электрической энергии. Расчет потерь электрической энергии в проводах воздушных линий при учете температурной зависимости активных сопротивлений предполагает использование уравнений теплового баланса.

Принимаемые при расчете допущения обуславливают использование при их решении аналитических [9–13] или численных методов [14–18].

Однако при вынужденной конвекции нелинейность уравнений вызвана исключительно лучистым теплообменом.

Закон Стефана–Больцмана показывает, что интенсивность этого теплообмена зависит от четвертых степеней температур. Из-за этого уравнение теплового баланса провода при вынужденной конвекции фактически становится алгебраическим уравнением четвертой степени. Уравнения такого типа поддаются прямому аналитическому решению.

Для случая вынужденной конвекции соотношение в уравнении теплового баланса воздушной линии электроэнергетической системы можно представить в виде [19]:

Производство электроэнергии

ТВт · час	ГОД										
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Северная Америка	5293,8	5243,5	5283,1	5314,2	5318,4	5331,1	5292,2	5452,5	5406,5	5259,7	5383,5
Юж. и Центр. Америка	1181,2	1231,4	1270,3	1289,8	1298,2	1305,2	1305,7	1319	1327,3	1302,5	1364,8
Европа	4019,3	4052,2	4021,4	3937,5	3981,4	4020,4	4060,2	4063,1	3993,4	3879	4032,5
Россия	1054,9	1069,3	1059,1	1064,2	1067,5	1091	1091,2	1109,2	1118,1	1085,4	1157,1
СНГ	1308,5	1330,4	1323,7	1337,9	1340,9	1369,3	1383	1416,4	1428,8	1400,7	1488
Ближний Восток	900,4	959,1	993,5	1064,5	1121,7	1147	1204,3	1204,2	1229,3	1243	1305,6
Африка	690,3	722,5	745,5	770,1	790,5	800,1	826,6	849,7	867,6	855,1	897,5
Азиатско-Тихоокеанский регион	8875,5	9278,3	9815	10335,8	10440,9	10951,1	11575,6	12372,4	12783,7	12949,3	13994,4
МИР	22268,9	22817,5	23452,4	24049,8	24292	24924,2	25647,7	26677,3	27036,6	26889,2	28466,3

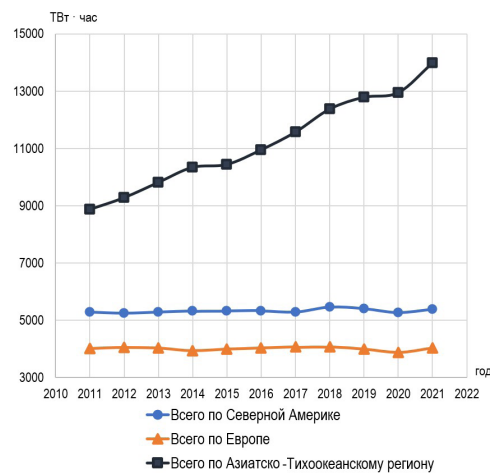
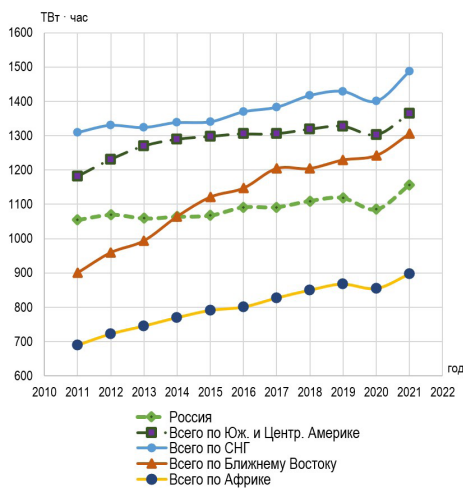


Рис. 1. Графики темпа роста генерации электрической энергии по регионам мира

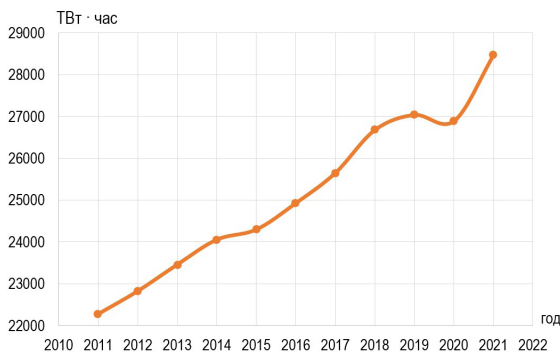


Рис. 2. График темпа роста генерации электрической энергии в мире за 2011–2021 гг.

$$\Delta P_0(1 + \alpha\theta_{внеш}) = d_{np}(1 - \alpha\Delta P_0 S_{из}) \times \left[\begin{array}{l} \pi\alpha_{вын}(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \\ + \pi\varepsilon_n C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \end{array} \right] \quad (1)$$

где ΔP_0 — потери активной мощности на единицу длины, вычисленные при сопротивлении, приведённом к 0 °С; α — температурный коэффициент сопротивления; $\theta_{внеш}$ и $\theta_{окр}$ — температуры поверхности провода и окружающей среды в °С; d_{np} —

диаметр провода; $S_{из}$ — тепловое сопротивление изоляции на единицу длины провода; $\alpha_{вын}$ — коэффициент теплоотдачи, вынужденной конвекцией; ε_n — коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная излучения абсолютно чёрного тела; $T_{внеш}$ и $T_{окр}$ — абсолютные температуры поверхности провода и окружающей среды; A_s — поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения; $q_{солн}$ — плотность потока солнечной радиации на провод.

Исследуем отдельные составляющие выражения (1).

Для удобства дальнейшего рассмотрения разделим обе части уравнения на произведение выражений $C = (1 - \alpha\Delta P_0 S_{из})$ и $M = (\pi d_{np} \varepsilon_n C_0)$.

Рассмотрим левую часть уравнения (1):

$$\begin{aligned} \frac{(1 - \alpha\Delta P_0 S_{из})}{CM} &= \frac{\Delta P_0 + \alpha\Delta P_0 \theta_{внеш}}{\Delta P_0 + \alpha\Delta P_0(T_{внеш} - 273,15)} = \\ &= \frac{\Delta P_0}{CM} + \frac{\alpha\Delta P_0 T_{внеш}}{CM} - \frac{273,15\alpha\Delta P_0}{CM} = \\ &= \frac{\Delta P_0(1 - 273,15\alpha)}{CM} + \frac{\alpha\Delta P_0 T_{внеш}}{CM}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим составляющие правой части. Для первой составляющей получим:

$$\frac{d_{np}(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi \alpha_{вын} (\theta_{внеш} - \theta_{окр})}{(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi d_{np} \varepsilon_n C_0} = \frac{(T_{внеш} - T_{окр}) \alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0} = \frac{T_{внеш} \alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0} - \frac{T_{окр} \alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0}. \quad (3)$$

Вторую составляющую с учетом вычислений C и M представим следующим образом:

$$\frac{d_{np}(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi \varepsilon_n C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4)}{(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi d_{np} \varepsilon_n C_0} = T_{внеш}^4 - T_{окр}^4. \quad (4)$$

Третья составляющая преобразуется к виду:

$$\frac{d_{np}(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) (-A_s q_{сольн})}{(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi d_{np} \varepsilon_n C_0} = -\frac{A_s q_{сольн}}{\pi \varepsilon_n C_0}. \quad (5)$$

После проведенных исследований уравнение (1) может быть представлено в виде:

$$T_{внеш}^4 + A_1 T_{внеш} + A_0 = 0, \quad (6)$$

где

$$A_1 = \frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0} - \frac{\alpha \Delta P_0}{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz})}; \quad (7)$$

$$A_0 = \frac{\Delta P_0 (273,15 \alpha - 1)}{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz})} - \frac{A_s q_{сольн}}{\pi \varepsilon_n C_0} - \frac{\alpha_{вын} T_{окр}}{\varepsilon_n C_0} - T_{окр}^4. \quad (8)$$

Для решения уравнения четвертой степени, у которого отсутствует неизвестное третьей степени, удобно использовать аналитический метод Феррари.

Решение основано на введении вспомогательного параметра β , с помощью которого уравнение вида:

$$x^4 + px^2 + qx + r = 0 \quad (9)$$

при $p = 0$ преобразуется следующим образом [20]:

$$(x^2 + \beta^2) - [2\beta x^2 - qx + (\beta^2 - r)] = 0. \quad (10)$$

Возвращаясь к уравнению с переменной $T_{внеш}$ и учитывая, что $q = A_1$, $r = A_0$, имеем:

$$(T_{внеш} + \beta)^2 - [(2\beta T_{внеш}^2 - A_1 T_{внеш} + (\beta^2 - A_0))] = 0. \quad (11)$$

Дополнительно значение параметра β должно удовлетворять требованию, при котором слагаемое в квадратных скобках соответствовало бы полному квадрату. Данное требование реализуется при равенстве дискриминанта нулю.

$$A_1^2 - 4 \cdot 2\beta(\beta^2 - A_0) = A_1^2 - 8\beta^3 - 8\beta A_0 = \beta^3 + A_0 \beta - \frac{A_1^2}{8} = 0. \quad (12)$$

Для решения получившегося относительно β кубического уравнения используем формулу Кардано.

Согласно подходу Кардано, решение кубического уравнения вида:

$$x^3 + Sx + k = 0 \quad (13)$$

можно находить по формуле:

$$x = \sqrt[3]{-\frac{k}{2} + \sqrt{\frac{k^2}{4} - \frac{S^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{k}{2} - \sqrt{\frac{k^2}{4} - \frac{S^3}{27}}}. \quad (14)$$

Преобразуем эту формулу для уравнения относительно параметра β , учитывая, что $k = -A_1^2/8$; $S = A_0$ по аналогии получим:

$$\beta = \sqrt[3]{-\left(-\frac{A_1^2}{8}\right) + \sqrt{\left(-\frac{A_1^2}{8}\right)^2 - \frac{A_0^3}{4}}} + \sqrt[3]{-\left(-\frac{A_1^2}{8}\right) - \sqrt{\left(-\frac{A_1^2}{8}\right)^2 - \frac{A_0^3}{4}}}. \quad (15)$$

После проведенных преобразований получим уравнение:

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} + \frac{A_0^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} - \sqrt{\frac{A_1^4}{256} + \frac{A_0^3}{27}}}. \quad (16)$$

Найденные значения β позволяют решение уравнения четвертой степени свести к уравнению [20]:

$$\left(x^2 + \frac{p}{2} + \beta\right)^2 - 2\beta \left(x - \frac{q}{4\beta}\right) = 0. \quad (17)$$

С учетом условий $p = 0$, $q = A_1$, по аналогии для уравнения (11) получим:

$$(T_{внеш}^2 + \beta)^2 - 2\beta \left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right) = 0. \quad (18)$$

Запишем его иначе:

$$(T_{внеш}^2 + \beta) = 2\beta \left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right). \quad (19)$$

Это уравнение эквивалентно двум уравнениям:

$$T_{внеш}^2 + \beta = \pm \sqrt{2\beta} \left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right). \quad (20)$$

Представим их более подробно:

$$T_{внеш}^2 + \beta + \sqrt{2\beta} \left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right) = 0; \quad (21)$$

$$T_{внеш}^2 + \beta - \sqrt{2\beta} \left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right) = 0. \quad (22)$$

Преобразуем полученные уравнения к более удобному для анализа виду:

$$T_{внеш}^2 + \beta + \sqrt{2\beta} T_{внеш} - \sqrt{2\beta} \frac{A_1}{4\beta} = 0; \quad (23)$$

Исходные данные для расчёта температуры провода SAX-50

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Диаметр провода d_{np}	0,0127 м
Погонное активное сопротивление при 0 °С r_0	0,000663 Ом/м
Плотность потока солнечной радиации $q_{солн}$	526,291 Вт/м ²
Абсолютная температура окружающей среды $T_{окр}$	273,15 К
Тепловое сопротивление изоляции на единицу длины $S_{из}$	0,193566 м ² °С/Вт
Коэффициент теплоотдачи, вынужденной конвекцией $\alpha_{вын}$	13,3764
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °С ⁻¹
Степень черноты поверхности провода ϵ_n	0,8
Ток в проводе I	200 А
Постоянная излучения абсолютно чёрного тела C_0	$5,67 \cdot 10^{-8}$
Температура окружающей среды $\theta_{окр}$	0 °С
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,9
Скорость ветра V	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра k_v	0,5

$$T_{внеш}^2 + \beta - \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \sqrt{2\beta} \frac{A_1}{4\beta} = 0. \quad (24)$$

После сокращений имеем:

$$T_{внеш}^2 + \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta - \frac{A_1}{2\sqrt{2\beta}} = 0; \quad (25)$$

$$T_{внеш}^2 - \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta + \frac{A_1}{2\sqrt{2\beta}} = 0 \quad (26)$$

или

$$T_{внеш}^2 + \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta - \frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} = 0; \quad (27)$$

$$T_{внеш}^2 - \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta + \frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} = 0. \quad (28)$$

По формулам для квадратичного уравнения находим:

$$T_{внеш,1,2} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} \pm \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}; \quad (29)$$

$$T_{внеш,3,4} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} \pm \sqrt{-\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}. \quad (30)$$

Проанализируем получившиеся четыре решения. Допустим, $\alpha = 0$. Это допущение означает отсутствие температурной зависимости сопротивления. Анализируя формулы (7) и (8) при $\alpha = 0$, получаем, что $A_1 > 0$, и $A_0 < 0$.

Выполнение условий $A_1 > 0$ и $A_0 < 0$ не является исключительной прерогативой соотношения $\alpha = 0$. Положительное значение A_1 и отрицательное значение A_0 имеет место и при отличии от нуля температурного коэффициента сопротивления при нормальных режимах работы воздушных линий электроэнергетических систем.

При $A_1 > 0$, и $A_0 < 0$ из уравнения (16) следует, что β — действительное положительное число.

Приведенное выше обоснование $A_1 > 0$ и $\beta > 0$ означает комплексно-сопряжённые корни из уравнения (30). Поэтому они не подходят.

Необходимо также убрать из рассмотрения корень из уравнения (29), равный действительному отрицательному числу:

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} - \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}. \quad (31)$$

Следовательно, температура внешней поверхности изолированного провода в большей степени соответствует формуле:

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} + \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}. \quad (32)$$

Данное уравнение позволяет аналитически найти потери и температуру в изолированных и не изолированных проводах соответственно по уравнению:

$$\theta_{np} = \frac{\theta_{внеш} + \Delta P_0 S_{из}}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{из}} = \theta_{внеш} + \Delta P S_{из}; \quad (33)$$

$$\Delta P = \frac{\Delta P_0 (1 - \theta_{внеш})}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{из}} = \Delta P_0 (1 + \alpha \theta_{np}); \quad (34)$$

Расчёт параметров проводов воздушной линии электроэнергетических систем. Применим полученные формулы для расчёта потерь и температуры в изолированном проводе SAX-50.

Исходные значения для расчёта представим в табл. 2.

Найдём потери активной мощности на единицу длины ΔP_0 для активного сопротивления r_0 при 0 °С, а также другие необходимые величины:

$$\Delta P_0 = I^2 r_0 = 200^2 \cdot 0,00063 = 26,52 \text{ Вт/м}. \quad (35)$$

Коэффициенты A_1 и A_0 по формулам (7) и (8) соответственно будут равны:

$$A_1 = \frac{\alpha_{вын}}{\epsilon_n C_0} - \frac{\alpha \Delta P_0}{\pi d_{np} \epsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{из})} = \frac{13,3764}{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} - \frac{0,0043 \cdot 26,52}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1 - 0,0043 \cdot 26,52 \cdot 0,193566)} = 2,3046 \cdot 10^8 \text{ К}^3. \quad (36)$$

$$A_0 = \frac{\Delta P_0 (273,15 \alpha - 1)}{\pi d_{np} \epsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{из})} - \frac{A_s q_{солн}}{\pi \epsilon_n C_0} - \frac{\alpha_{вын} T_{окр}}{\epsilon_n C_0} - T_{окр}^4 = \frac{26,52 (273,15 \cdot 0,0043 - 1)}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1 - 0,0043 \cdot 26,52 \cdot 0,193566)} - \frac{0,9 \cdot 526,291}{\pi \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} - \frac{13,3764 \cdot 273,15}{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} - 273,15^4 = -8,6826 \cdot 10^{10} \text{ К}^4. \quad (37)$$

Из формулы (16) найдём параметр β :

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}} =$$

Результаты сравнения потерь и температуры в проводе SAX-50 различными методами

	Метод Феррари	Метод наименьших квадратов	Итерационный метод
Температура провода θ_{np} , °C	$\theta_{np,\phi} = 60,41$	$\theta_{np,u} = 60,37$	$\theta_{np,u} = 60,4$
Потери активной мощности ΔP при θ_{np} , кВт/км	$\Delta P_{\phi} = 33,41$	$\Delta P_u = 33,4$	$\Delta P_u = 33,41$
Абсолютная погрешность расчёта температуры $\Delta\theta_{np}$, °C	$\theta_{np,\phi} - \theta_{np,u} = 0,01$	$\theta_{np,u} - \theta_{np,u} = -0,03$	0
Относительная погрешность расчёта потерь %	$\frac{\Delta P_{\phi} - \Delta P_u}{\Delta P_u} \times 100\% = 0$	$\frac{\Delta P_u - \Delta P_u}{\Delta P_u} \times 100\% = -0,03$	0

$$= \sqrt[3]{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^2}{16} + \sqrt{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^4}{256} + \frac{(8,6826 \cdot 10^8)^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^2}{16} - \sqrt{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^4}{256} - \frac{(8,6826 \cdot 10^8)^3}{27}}} = 72139,2 \text{ K}^2. \quad (38)$$

Температуру внешней поверхности провода находим по формуле (32):

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} + \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}} = -\sqrt{\frac{72139,2}{2}} + \sqrt{\frac{2,3046 \cdot 10^8}{\sqrt{8 \cdot 72139,2}} - \frac{72139,2}{2}} = 327,09 \text{ K}; \quad (39)$$

$$\theta_{внеш} = 327,09 - 273,15 = 53,94 \text{ °C}. \quad (40)$$

Следовательно, температура токоведущей части, согласно уравнению (33), будет равна:

$$\theta_{np} = \frac{\theta_{внеш} + \Delta P_0 S_{уз}}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{уз}} = \frac{53,94 + 26,52 \cdot 0,193566}{1 - 0,0043 \cdot 26,52 \cdot 0,193566} = 60,41 \text{ °C}. \quad (41)$$

Полученные данные сравним с результатами потерь и температуры, полученными на основе решения уравнения теплового баланса методом наименьших квадратов [21] и итерационным методом (табл. 3).

Представленные в табл. 3 обозначения $\theta_{np,\phi}$, $\theta_{np,u}$ и $\theta_{np,u}$ относятся к расчетам температуры соответственно в методе Феррари, методе наименьших квадратов и итерационном методе. Аналогично обозначения ΔP_{ϕ} , ΔP_u и ΔP_u представляют значения потерь активной мощности определенные соответственно по методу Феррари, методу наименьших квадратов и итерационному методу.

Исходя из данных табл. 3 по значениям температуры и значениям потерь активной мощности видно, что указанные значения, найденные различными методами с высокой степенью точности, совпадают. Погрешность расчета по потерям активной мощности либо отсутствует (сравнение с итерационным методом), либо очень маленькая (0,03 % при сравнении с методом наименьших квадратов). Таким образом, рассмотренный метод обеспечивает высокую точность, позволяет с единых позиций проводить исследование неизолированных и изолированных проводов с учетом погодных условий

и нагрузки обогащает теоретическую базу для разработки технологии Smart Grid.

Библиографический список

1. World Energy Outlook 2020 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
2. Statistical Review of World Energy 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
3. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
4. Kühnel C., Bardl R., Stengel D. [et al.]. Investigations on the mechanical and electrical behaviour of HTLS conductors by accelerated ageing tests // CIRED. 2017. Vol. 2017. P. 273–277. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0200.
5. Albizu I., Fernández E., Alberdi R. [et al.]. Adaptive Static Line Rating for Systems With HTLS Conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 2849–2855. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2855805.
6. Nuchprayoon S., Chaichana A. Cost evaluation of current uprating of overhead transmission lines using ACSR and HTLS conductors // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977606.
7. Michiorri A., Nguyen H., Alessandrini S. [et al.]. Forecasting for dynamic line rating // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 52. P. 1713–1730. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.134.
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. 2019. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epr.2018.11.003.
9. Воротницкий В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеословий // Электрические станции. 2008. № 10. С. 42–49.
10. Зарудский Г. К., Сыромятников С. Ю. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения // Вестник МЭИ. 2008. № 2. С. 37–42.
11. Girshin S. S., Bigun A. Ya., Kropotin O. V. [et al.]. Comparison approximate analytical solution of the nonlinear differential equation of heating with numerical // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052006.
12. Shepelev A. O., Petrova E. V., Sidorov O. A. Consideration of active resistances temperature dependency of power transformers when calculating power losses in grids // Proceedings – 2018

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728811.

13. Kuznetsov E. A., Goryunov V. N., Girshin S. S. [et al.]. Influence of insulation on thermal behavior of overhead line conductors // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2019. V. 8, no. 1. P. 109–113. DOI: 10.18178/ijmerr.8.1.109-113.

14. Герасименко А. А., Шульгин И. В., Тимофеев Г. С. Комплексный учет режимно-атмосферных факторов в расчете активного сопротивления и потерь электроэнергии в ЛЭП // Оптимизация режимов работы электрических систем: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск, 2008. С. 188-206.

15. Левченко И. И., Сацук Е. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях // Электричество. 2008. № 4. С. 2–8.

16. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V. [et al.]. Mathematical Model of Electric Energy Losses Calculating in Crosslinked Four-Wire Polyethylene Insulated (XLPE) Aerial Bundled Cables // ELEKTRO 2016: proceeding of 11th International Conference. 2016. P. 294–299. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084.

17. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A. [et al.]. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation // Przegląd Elektrotechniczny. 2019. Vol. 95, no. 6. P. 77–80. DOI: 10.15199/48.2019.06.14.

18. Bigun A. Y., Sidorov O. A., Osipov D. S. [et al.]. Mode and climatic factors effect on energy losses in transient heat modes of transmission lines // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 1–11. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012016.

19. 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.

20. Курош А. Г. Курс высшей алгебры: Москва: Наука, 1968. 431 с.

21. Гиршин С. С. Приближенное решение уравнения теплового баланса проводов воздушных линий при теплоотдаче естественной конвекцией // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 217.

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

Адрес для переписки: evpetrova2000@yandex.ru

Для цитирования

Петрова Е. В. Аналитический метод расчета потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом изменения нагрузки и погодных условий // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 101–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-101-108.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023 г.

© Е. В. Петрова

ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING LOSSES IN OVERHEAD LINES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN LOAD AND WEATHER CONDITIONS

In this article, the subject of research is methods for calculating active power losses in electric power overhead lines, taking into account the temperature dependence of active resistances. An analytical approach based on the Ferrari method for calculating the wire temperature and active power losses under conditions of forced convection is proposed and substantiated in detail. The peculiarity of the approach is universality, which is expressed in the fact that the developed mathematical model allows us to consider non-insulated and insulated wires on power transmission lines from a single position. The results of calculating the temperature and active power losses by the proposed method, the least squares method and the iterative method are presented. The high accuracy of the coincidence of the results obtained by various methods is noted.

Keywords: wire temperature, heat balance equation, forced convection, temperature dependence of resistance, loss of active power, overhead power lines.

References

1. World Energy Outlook 2020 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf> (accessed: 17.05.2023). (In Engl.).
2. Statistical Review of World Energy 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed: 17.05.2023). (In Engl.).
3. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (accessed: 17.05.2023). (In Engl.).
4. Kühnel C., Bardl R., Stengel D. [et al.]. Investigations on the mechanical and electrical behavior of HTLS conductors by accelerated ageing tests // CIREN. 2017. Vol. 2017. P. 273–277. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0200. (In Engl.).
5. Albizu I., Fernández E., Alberdi R. [et al.]. Adaptive Static Line Rating for Systems With HTLS Conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 2849–2855. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2855805. (In Engl.).
6. Nuchprayoon S., Chaichana A. Cost evaluation of current uprating of overhead transmission lines using ACSR and HTLS conductors // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977606. (In Engl.).
7. Michiorri A., Nguyen H., Alessandrini S. [et al.]. Forecasting for dynamic line rating // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 52. P. 1713–1730. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.134. (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. 2019. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epr.2018.11.003. (In Engl.).
9. Vorotnitskiy V. E., Turkina O. V. Otsenka pogreshnostey rascheta poter' elektroenergii v VL iz-za neucheta meteoulovij [Estimation of errors in calculating electricity losses in overhead lines due to non-accounting of weather conditions] // Elektricheskiye stantsii. *Electric Stations*. 2008. No. 10. P. 42–49. (In Russ.).
10. Zarudskiy G. K., Syromyatnikov S. Yu. Utochneniye vyrazheniy dlya rascheta temperatury provodov vozduzhnykh liniy elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya [More precise expressions for temperature calculation of EHV electrical transmission overhead lines] // Vestnik MEI. *Bulletin of MPEI*. 2008. No. 2. P. 37–42. (In Russ.).
11. Girshin S. S., Bigun A. Ya., Kropotin O. V. [et al.]. Comparison approximate analytical solution of the nonlinear differential equation of heating with numerical // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052006. (In Engl.).
12. Shepelev A. O., Petrova E. V., Sidorov O. A. Consideration of active resistances temperature dependency of power transformers when calculating power losses in grids // Proceedings – 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728811. (In Engl.).
13. Kuznetsov E. A., Goryunov V. N., Girshin S. S. [et al.]. Influence of insulation on thermal behavior of overhead line conductors // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2019. Vol. 8, no. 1. P. 109–113. DOI: 10.18178/ijmerr.8.1.109-113. (In Engl.).
14. Gerasimenko A. A., Shul'gin I. V., Timofeyev G. S. Kompleksnyy uchet rezhimno-atmosfernykh faktorov v raschete aktivnogo soprotivleniya i poter' elektroenergii v LEP [Comprehensive accounting of regime-atmospheric factors

in the calculation of active resistance and power losses in power lines] // Optimizatsiya rezhimov raboty elektricheskikh system. *Optimization of Operating Modes of Electrical Systems*. Krasnoyarsk, 2008. P. 188–206. (In Russ.).

15. Levchenko I. I., Satsuk E. I. Nagruzochnaya sposobnost' i monitoring vozduzhnykh liniy elektroperedachi v ekstremal'nykh pogodnykh usloviyakh [Loading capacity and monitoring of overhead power transmission lines under extreme weather conditions] // *Elektrichestvo. Electricity*. 2008. No. 4. P. 2–8. (In Russ.).

16. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V. [et al.]. Mathematical Model of Electric Energy Losses Calculating in Crosslinked Four-Wire Polyethylene Insulated (XLPE) Aerial Bundled Cables // *ELEKTRO 2016: proceeding of 11th International Conference*. 2016. P. 294–299. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084. (In Engl.).

17. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A. [et al.]. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation // *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95, no. 6. P. 77–80. DOI: 10.15199/48.2019.06.14. (In Engl.).

18. Bigun A. Y., Sidorov O. A., Osipov D. S. [et al.]. Mode and climatic factors effect on energy losses in transient heat modes of transmission lines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944. P. 1–11. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012016. (In Engl.).

19. Petrova E. V., Girshin S. S., Lyashkov A. A. [et al.]. Analiticheskoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provoda vozduzhnoy linii v usloviyakh vynuuzhdennoy konveksii [The analytical decision of the equation of thermal balance of the wire of the air-line in the conditions of compelled convection] //

Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Modern Problems of Science and Education. 2013. No. 1–1. P. 218. (In Russ.).

20. Kurosh A. G. Kurs vysshey algebry [Higher Algebra course]. Moscow, 1968. 431 p. (In Russ.).

21. Girshin S. S. Priblizhennoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provodov vozduzhnykh liniy pri teplotdache estestvennoy konveksii [The approached decision of the equation of thermal balance of wires of air-lines at the heat transferrational convection] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Modern Problems of Science and Education*. 2015. No. 1–1. P. 217. (In Russ.).

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

Correspondence address: evpetrova2000@yandex.ru

For citations

Petrova E. V. Analytical method for calculating losses in overhead lines of electric power systems taking into account changes in load and weather conditions // *Omsk Scientific Bulletin. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 101–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-101-108.

Received April 24, 2023.

© E. V. Petrova

Шахтинский автодорожный институт
(филиал) Южно-Российского
государственного политехнического
университета (НПИ) им. М. И. Платова,
г. Шахты

РЕЗУЛЬТАТЫ КИНЕТОСТАТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ПОЛЗУННО-КОРОМЫСЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

По данным Росавтостата основной причиной дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов является плохая видимость. Водителям в сумеречное и ночное время сложно заметить пешехода и сам пешеходный переход, несмотря на наличие дорожного знака. Для повышения безопасности дорожного движения в настоящее время используются автономные ветросолнечные установки. С другой стороны, мировым научным сообществом изучается возможность применения на практике такого класса устройств, как дорожные энергетические установки. Принцип действия таких установок основан на преобразовании энергии движения автомобиля в электрическую энергию. Целью данного исследования является определение сил, действующих в механизме дорожной энергетической установки, при проезде автомобиля. В результате силового исследования дорожной энергетической установки определены силы, возникающие в механическом преобразователе энергии проезжающего автомобиля в электрическую энергию.

Расчеты показали, что при проезде среднестатистического автомобиля массой 1600 кг через дорожную энергетическую установку на валу генератора возникает крутящий момент 393 Нм. При этом в генераторе возникает момент сопротивления, величина которого зависит от скорости проезжающего автомобиля: при скорости 20 км/ч момент сопротивления равен 115 Нм; при скорости 30 км/ч момент сопротивления равен 260 Нм; при скорости 40 км/ч момент сопротивления равен 390 Нм.

Количество энергии, накопленной маховиком, прямопропорционально величине скорости и принимает значения: при скорости 20 км/ч количество энергии равно 47 Дж; при скорости 30 км/ч количество энергии равно 105 Дж; при скорости 40 км/ч количество энергии равно 165 Дж.

Данные расчетов показывают, что дорожная энергетическая установка работоспособна при заданных параметрах конструктивных элементов.

Ключевые слова: дорожная энергетическая установка, автономный источник энергии, энергия транспортного потока, искусственная неровность, возобновляемая энергетика.

Введение. Согласно отчету всемирной ассоциации возобновляемой энергетики «Renewable Energy Policy Network», доля альтернативных источников энергии ежегодно растет [1]. Анализ отечественной и зарубежной научной литературы показывает, что учеными из разных стран уделяется внимание разработке такого класса устройств, как дорожные энергетические установки. Исследования, посвященные дорожным энергетическим установкам, проводятся в следующих странах: США [2, 3], Китай [4], Индия [5], Пакистан [6], Палестина [7], Франция [8], Бахрейн [9] и в др. Принцип действия дорожных энергетических установок основан на том, что в момент наезда транспортного средства на искус-

ственную дорожную неровность последняя получает импульс энергии, который можно преобразовать в электрическую энергию и использовать для электроснабжения объектов дорожной инфраструктуры (освещение пешеходных переходов, подсветка дорожных знаков, электроснабжение светофоров). В вышеперечисленных исследованиях преобразователь поступательного движения автотранспортного средства во вращательное движение генератора выполняется в виде зубчатой передачи, что существенно повышает стоимость всей конструкции. Авторами данного исследования предлагается конструкция дорожной энергетической установки, в которой исполнение преобразователя воздей-

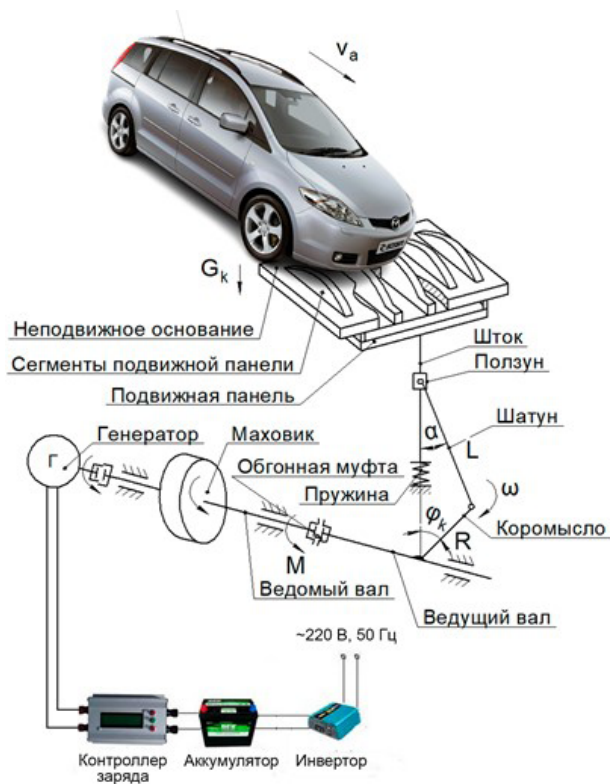


Рис. 1. Конструктивно-кинематическая схема дорожной энергетической установки

ствующего усилия в виде «ползунно-коромыслового механизма» [10, 11] и проведены исследования по определению конструктивных параметров ползунно-коромыслового механизма [12, 13]. В данном исследовании разработана расчетная схема для определения сил и моментов, возникающих в дорожной энергетической установке. Проведенный кинестатический анализ позволил определить энергетический потенциал дорожной энергетической установки и показывает, что при заданных параметрах конструктивных элементов представленное устройство работоспособно.

Принцип действия дорожной энергетической установки с ползунно-коромысловым преобразователем. Предлагаемая конструкция дорожной энергетической установки (рис. 1) выгодно отличается от существующих аналогов тем, что исполнение преобразователя воздействующего усилия в виде «ползунно-коромыслового механизма» существенно упрощает конструкцию установки путем перехода от высшей зубчатой кинематической пары звеньев к низшей вращающейся кинематической паре «шатун - коромысло», что снижает общую стоимость конструкции и увеличивает наработку звеньев на отказ.

Принцип действия дорожной энергетической установки следующий: установленное в уровень покрытия дорожного полотна неподвижное перфорированное основание обеспечивает плавность наезда и съезда автомобиля с энергетической установки. Автомобиль наезжает колесами на подвижную панель и шток, при утапливании кинематически связанных с ним сегментов подвижной панели опускается вниз. Приводятся в движение ползун, шатун и коромысло. Последние, через обгонную муфту создавая крутящий момент на ведомом валу, разгоняют маховик и ротор генератора.

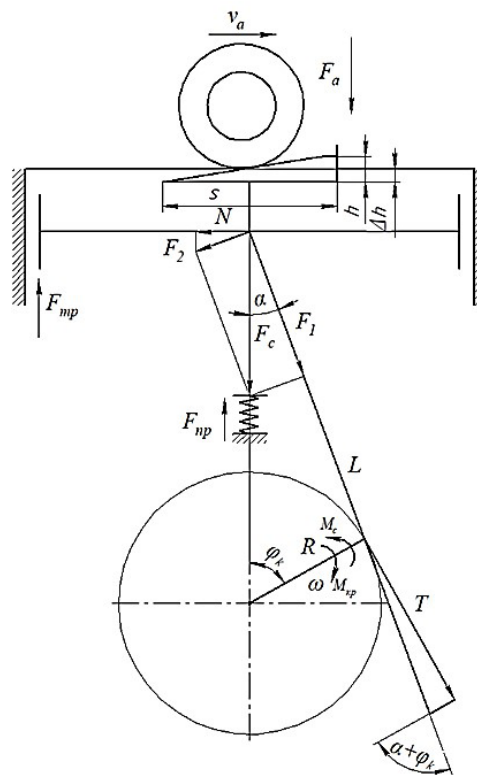


Рис. 2. Схема формирования сил, действующих на дорожную энергетическую установку в момент наезда автомобиля

Пружина, обеспечивающая возврат нажимной панели и ползунно-коромыслового механизма в исходное состояние после съезда автотранспортного средства, сжимается под воздействием перемещающегося штока.

Таким образом, дорожная энергетическая установка выступает в роли механизма рекуперации энергии, который замедляет движение транспортного средства путем преобразования его кинетической энергии в электрическую энергию, которая может быть использована немедленно или сохранена до необходимости.

В дорожной энергетической установке электрический генератор использует импульс транспортного средства для восстановления энергии, которая в противном случае была бы потеряна для тормозных дисков в виде тепла.

В традиционных тормозных системах избыточная кинетическая энергия преобразуется в нежелательное и потерянное тепло из-за трения в тормозах.

В дополнение к повышению общей эффективности транспортного средства рекуперация может значительно продлить срок службы тормозной системы, поскольку механические детали не будут быстро изнашиваться.

Анализ сил и моментов, действующих на дорожную энергетическую установку. Целью кинестатического расчета является определение сил, действующих на звенья механизма, реакций в кинематических парах и затрат энергии, необходимой для приведения механизма в движение и выполнения им работы в соответствии с его назначением.

Задачей кинестатического исследования является определение крутящего момента и момента сопротивления, развиваемых на валу маховика при проезде автомобиля, и количества энергии, запа-

сенной маховиком. Для анализа сил, действующих на дорожную энергетическую установку, рассмотрим расчетную схему (рис. 2).

Крутящий момент $M_{кр}$ на валу маховика в ползуно-коромысловом механизме определяется как произведение тангенциальной силы на радиус коромысла [14]:

$$M_{кр} = R \cdot T, \quad (1)$$

где R — радиус коромысла, T — тангенциальная сила, направленная по касательной к окружности вращения коромысла.

Согласно [14], тангенциальная сила определяется по формуле:

$$T = F_1 \cdot \sin(\alpha + \phi_k), \quad (2)$$

где F_1 — сила, приложенная к шатуну.

Сила, приложенная к шатуну, определяется как произведение суммарной свободной силы F_c , действующей по оси движения нажимной платформы дорожной энергетической установки на синус угла отклонения шатуна от вертикали:

$$F_1 = F_c \cdot \cos\alpha. \quad (3)$$

Под действием силы F_a возникает суммарная свободная сила F_c , действующая по оси движения нажимной платформы дорожной энергетической установки:

$$F_c = F_a - F_{mp} - F_{np}, \quad (4)$$

где F_a — сила, с которой автомобиль воздействует на нажимную платформу дорожной энергетической установки; F_{mp} — сила трения поступательно движущихся частей; F_{np} — сила сопротивления пружины.

В момент наезда на нажимную платформу передними колесами автомобиль, движущийся со скоростью v_a , воздействует на нажимную платформу с силой F_a , определяющуюся по формуле:

$$F_a = 1/2 \cdot m_a \cdot g. \quad (5)$$

где m_a — масса автомобиля; g — ускорение свободного падения.

Сила трения поступательно движущихся частей определяется по формуле:

$$F_{mp} = k \cdot N, \quad (6)$$

где k — коэффициент трения в подшипнике качения (принимается равным 0,002 согласно [15]);

N — сила нормального давления.

$$N = F_2 \cdot \cos\alpha, \quad (7)$$

где F_2 — нормальная сила, направленная к стенке нажимной платформы дорожной энергетической установки:

$$F_2 = \cos\alpha. \quad (8)$$

Сила сопротивления пружины определяется по формуле [16]:

$$F_{np} = k_x \cdot x, \quad (9)$$

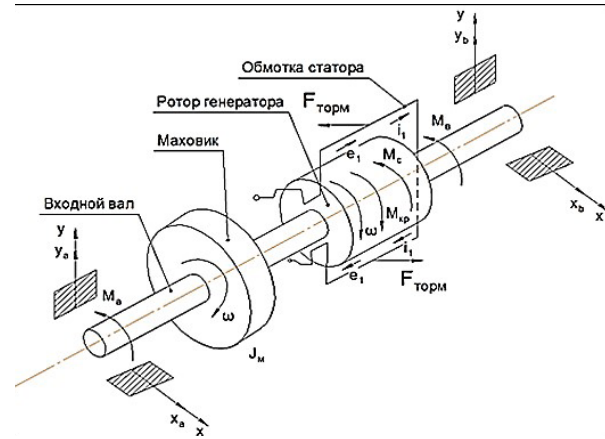


Рис. 3. Расчетная схема к определению моментов внешних сил

где $k_x = 10$ — коэффициент жесткости; $x = 0,06$ — величина, на которую сжимается пружина.

Помимо крутящего момента действуют следующие силы и моменты (рис. 3).

M_c — момент сопротивления, обусловленный трением в подшипниках, инерционностью маховика и ротора, а также электромагнитным моментом, создаваемым генератором;

J_M — суммарный момент инерции маховика и ротора генератора.

Момент инерции маховика определяется по формуле:

$$J_M = m_M \cdot r_M^2. \quad (10)$$

Момент сопротивления обусловлен трением в подшипниках, инерционностью маховика и электромагнитным моментом, создаваемым генератором:

$$M_c = \frac{J_M \cdot \omega}{t}, \quad (11)$$

где m_M — масса маховика; r_M — радиус маховика; ω — угловая скорость маховика, t — время, за которое автомобиль доезжает до середины нажимной панели.

Масса маховика определяется по формуле [16]:

$$m_M = \rho \cdot V, \quad (12)$$

где $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$ — удельная плотность материала [17]; V — объем маховика.

Объем маховика определяется по формуле:

$$V = \pi \cdot r_M^2 \cdot h_M, \quad (13)$$

где h_M — длина маховика.

Количество накопленной энергии маховиком дорожной энергетической установки:

$$E_M = 0,5 \cdot J_M \cdot \omega^2. \quad (14)$$

Результаты. Исследование проводится при параметрах конструктивных элементов дорожной энергетической установки, приведенных в табл. 1.

Согласно ГОСТ Р 52605-2006, применение искусственных дорожных неровностей осуществляется при следующих скоростях автотранспортного средства: 20, 30, 40 км/ч. Поэтому расчеты крутящего

Таблица 1

Параметры конструктивных элементов
дорожной энергетической установки

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Фактическое значение
Нажимная платформа			
Длина основания	l	м	0,5
Высота	h	м	0,06
Ползунно-коромысловый механизм			
Радиус коромысла	R	м	0,095
Длина шатуна	L	м	0,317
Начальное положение коромысла	$\varphi_{\text{нач}}$	Градусы	90,28
Конечное положение коромысла	$\varphi_{\text{кон}}$	Градусы	136,49
Маховик			
Масса	m_M	кг	42
Радиус	r_M	м	0,095
Длина	h_M	м	0,19
Генератор			
Тип генератора	Синхронный генератор с постоянными магнитами		
Номинальная мощность	$P_{\text{ном}}$	Вт	100
Номинальная угловая скорость	ω_r	рад/с	800

момента, момента сопротивления и энергетического потенциала целесообразно рассчитывать при вышеуказанных скоростях.

Результаты расчета моментов приведены на рис. 4. График изменения крутящего момента и момента сопротивления указывают на тот факт, что при выбранных начальном и конечном углах положения коромысла, на всем пути перемещения коромысла крутящий момент превышает момент сопротивления. Данный факт свидетельствует о том, что при выбранных начальных параметрах дорожная энергетическая установка работоспособна.

Результаты расчета энергии, накопленной маховиком, представлены на рис. 5.

Следует отметить, что на графике изображено накопление энергии при проезде только передних колес, т.е. энергетический потенциал рассматриваемой установки будет в два раза больше.

Выводы. В настоящее время учеными из разных стран мира разрабатываются различные конструкции дорожных энергетических установок с электромеханическим преобразователем. Для преобразования поступательного движения подвижной панели во вращательное движение вала маховика и генератора в настоящее время предлагается использовать зубчатые механические передачи. В данном исследовании предлагается произвести силовой анализ дорожной энергетической установки с ползунно-коромысловым механизмом.

В результате кинестатического исследования дорожной энергетической установки определены

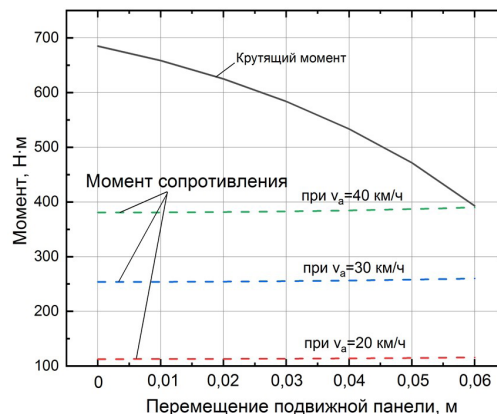


Рис. 4. График изменения крутящего момента и момента сопротивления

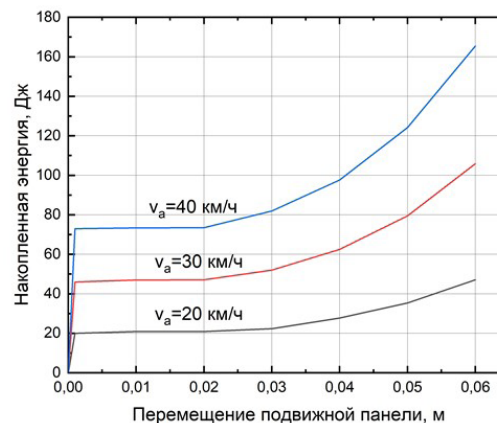


Рис. 5. График накопления энергии маховиком

силы, возникающие в механическом преобразователе энергии проезжающего автомобиля в электрическую энергию.

Расчеты показали, что при проезде среднестатистического автомобиля массой 1600 кг через дорожную энергетическую установку на валу генератора возникает крутящий момент 393 Н·м. При этом в генераторе возникает момент сопротивления, величина которого зависит от скорости проезжающего автомобиля:

- при скорости 20 км/ч момент сопротивления равен 115 Н·м;
- при скорости 30 км/ч момент сопротивления равен 260 Н·м;
- при скорости 40 км/ч момент сопротивления равен 390 Н·м.

Данные расчетов показывают, что дорожная энергетическая установка работоспособна при заданных параметрах конструктивных элементов.

Количество энергии, накопленной маховиком, прямопропорционально величине скорости и принимает значения:

- при скорости 20 км/ч количество энергии равно 47 Дж;
- при скорости 30 км/ч количество энергии равно 105 Дж;
- при скорости 40 км/ч количество энергии равно 165 Дж.

В будущих исследованиях планируется разработка имитационной модели дорожной энергетической установки для определения количества элек-

трической энергии, которую можно получить от проезда одного автомобиля.

Библиографический список

- Deshmukh M. K. G., Sameeroddin M., Abdul D. [et al.]. Renewable energy in the 21st century: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80. Part 3. P. 1756–1759. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.501.
- Walubita L. F., Faruk A. N. M., Helffrich J. [et al.]. The Quest for Renewable Energy—Effects of Different Asphalt Mixes and Laboratory Loading on Piezoelectric Energy Harvesters // *Energies*. 2023. Vol. 16 (1). 157. DOI: 10.3390/en16010157.
- Gholikhani M., Beheshti Shirazi S. Y., Mabrouk G. M. [et al.]. Dual electromagnetic energy harvesting technology for sustainable transportation systems // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 230 DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113804.
- Sun M., Wang W., Zheng P. [et al.]. A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways // *Sensors and Actuators. A: Physical*. 2021. Vol. 323. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112648.
- Srinivas R. S., Naresh H., Raghuvardhan N. Design and fabrication of A system for harnessing energy from road traffic // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5 (2). P. 6189–6194. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.226.
- Azam A., Ahmed A., Hayat N. [et al.]. Design, fabrication, modelling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (МЕН) for application on road // *Energy*. 2021. Vol. 214. 118894. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118894.
- Hassouna F. M. A. Assad M., Koa I. [et al.]. Energy and Environmental Implications of Using Energy-Harvesting Speed Humps in Nablus City // *Palestine. Atmosphere*. 2021. Vol. 12. 937. DOI: 10.3390/atmos12080937.
- Ramadan M., Khaled M., El Hage H. Using Speed Bump for Power Generation – Experimental Study // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. P. 867–872. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.192.
- Abdelrhman A. M., Karim A. R. A., Georgantopoulou C. [et al.]. Hybrid renewable energy harvesting device for street lightning in the Kingdom of Bahrain // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2676. 030006. DOI: 10.1063/5.0109867.
- Пат. 205403 U1 Российская Федерация, МПК F 03 G 7/08. Дорожная энергетическая установка / Ляшенко Ю. М., Прудий А. В., Колесник М. Н.; № 2021110180; заявл. 12.04.21; опубл. 13.07.21. Бюл. № 20. EDN LAXZPZ.
- Пат. 214465 U1 Российская Федерация, МПК F 03 G 7/08. Дорожная энергетическая установка / Ляшенко Ю. М., Прудий А. В., Волков Д. В.; № 2022123633; заявл. 05.09.22; опубл. 28.10.22. Бюл. № 31. EDN INQWVN.
- Ляшенко Ю. М., Прудий А. В., Колесник М. Н. Дорожная энергетическая установка с коромысло-шатунным преобразователем движения нажимной платформы // *Современные прикладные исследования: материалы Пятой национальной науч.-практ. конф., Шахты, 17–19 марта 2021 года. Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова, 2021. Т. 1. С. 227–231. EDN VXGIKG.*
- Ляшенко Ю. М., Прудий А. В. Исследование влияния движения звеньев механического преобразователя дорожной энергетической установки на функционирование генератора // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2021. Т. 21, № 3. С. 41–48. DOI: 10.14529/power210305. EDN JNEEDO.
- Лукин А. М., Квадыков В. В. Теоретическая механика (раздел «Динамика»). Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. 372 с.
- Перель Л. Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание: справ. Москва: Машиностроение, 1983. 543 с.
- Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1. В 3 т. Механика. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 340 с.
- Поливанов П. М., Поливанова Е. П. Таблицы для подсчета массы деталей и материалов: справ. 12-е изд., испр. и доп. Москва: Машиностроение, 2003. 304 с.

ПРУДИЙ Алексей Васильевич, старший преподаватель кафедры «Транспортная безопасность и управление дорожной инфраструктурой» Шахтинского автодорожного института (филиал) Южно-Российского государственного университета (НПИ) им. М. И. Платова (ШАИ (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова), г. Шахты.
 SPIN-код: 5223-3876
 AuthorID (РИНЦ): 795980
 ORCID: 0000-0003-0236-8821
 AuthorID (SCOPUS): 57771787400
 Адрес для переписки: prudiy@yandex.ru

ЛЯШЕНКО Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Транспортная безопасность и управление дорожной инфраструктурой» ШАИ (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Шахты.
 SPIN-код: 7361-3127
 AuthorID (РИНЦ): 862931
 ORCID: 0000-0002-6553-0163
 AuthorID (SCOPUS): 6603581379
 Адрес для переписки: lumdtn@yandex.ru

Для цитирования

Прудий А. В., Ляшенко Ю. М. Результаты кинетостатического исследования дорожной энергетической установки с ползуно-коромысловым преобразователем // *Омский научный вестник*. 2023. № 3 (187). С. 109–115. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-109-115.

Статья поступила в редакцию 23.03.2023 г.
 © А. В. Прудий, Ю. М. Ляшенко

Shakhty Automobile
and Road Construction Institute (branch)
Platov South-Russian
State Polytechnic University (NPI)
Shakhty, Russia

RESULTS OF KINETOSTATIC RESEARCH OF ROAD ENERGY HARVESTING SYSTEM WITH SLIDER-ROCKER MECHANISM

The base factor of accidents with pedestrians is zero visibility as revealed by Russian auto statistic. Drivers have a poor view of pedestrians and crosswalk at twilight and night against road sign. Currently autonomous wind turbines and solar panels are used for improve of road safety. From another angle practice possibility of equipment type as road energy harvesting system is studying scientific collaboration. Operation of the systems is based on car motion energy conversion to electrical energy. The research goal is force determination acting in mechanism of road energy harvesting system. As a result of force study of road energy harvesting system, the forces in mechanical energy converter to electrical energy are determined when a car pass. On generator shaft torque is created equal 393 Num when typical car passes with 1600 kg mass by way road energy harvesting system from the performed calculations. Moreover, in generator resistive torque produces with value depending speed of moving car: at speed of 20 km/h the resistive torque is 115 Num; at speed of 30 km/h resistive torque is 260 Num; at speed of 40 km/h resistive torque is 390 Num.

The energy amount saved by flywheel is directly proportional to speed and has values: at speed of 20 km/h energy is 47 J; at speed of 30 km/h energy is 105 J; at speed of 40 km/h energy is 165 J.

The calculation data show that road energy harvesting system is operable with given parameters of construction elements.

Keywords: road energy harvesting system, self-generated energy sources, energy of the transport flow, speed bump, renewable energy.

Reference

1. Deshmukh M. K. G., Sameeroddin M., Abdul D. [et al.]. Renewable energy in the 21st century: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80. Part 3. P. 1756–1759. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.501. (In Engl.).
2. Walubita L. F., Faruk A. N. M., Helffrich J. [et al.]. The Quest for Renewable Energy – Effects of Different Asphalt Mixes and Laboratory Loading on Piezoelectric Energy Harvesters // *Energies*. 2023. Vol. 16 (1). 157. DOI: 10.3390/en16010157. (In Engl.).
3. Gholikhani M., Beheshti Shirazi S. Y., Mabrouk G. M. [et al.]. Dual electromagnetic energy harvesting technology for sustainable transportation systems // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 230. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113804. (In Engl.).
4. Sun M., Wang W., Zheng P. [et al.]. A novel road energy harvesting system based on a spatial double V-shaped mechanism for near-zero-energy toll stations on expressways // *Sensors and Actuators. A: Physical*. 2021. Vol. 323. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112648. (In Engl.).
5. Srinivas R. S., Naresh H., Raghuvardhan N. Design and fabrication of A system for harnessing energy from road traffic // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5 (2). P. 6189–6194. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.226. (In Engl.).
6. Azam A., Ahmed A., Hayat N. [et al.]. Design, fabrication, modeling and analyses of a movable speed bump-based mechanical energy harvester (MEH) for application on road // *Energy*. 2021. Vol. 214. 118894. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118894. (In Engl.).
7. Hassouna F. M. A., Assad M., Koa I. [et al.]. Energy and Environmental Implications of Using Energy-Harvesting Speed Humps in Nablus City // *Palestine. Atmosphere*. 2021. Vol. 12. 937. DOI: 10.3390/atmos12080937. (In Engl.).
8. Ramadan M., Khaled M., El Hage H. Using Speed Bump for Power Generation – Experimental Study // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. P. 867–872. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.192. (In Engl.).
9. Abdelrhman A. M., Karim A. R. A., Georgantopoulou C. [et al.]. Hybrid renewable energy harvesting device for street lightning in the Kingdom of Bahrain // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2676. 030006. DOI: 10.1063/5.0109867. (In Engl.).
10. Patent 205403 U1 Russian Federation, IPC F 03 G 7/08. Dorozhnaya energeticheskaya ustanovka [Road power plant] / Lyashenko Yu. M., Prudiy A. V., Kolesnik M. N. No. 2021110180. (In Russ.).

11. Patent 214465 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F03G 7/08. Dorozhnaya energeticheskaya ustanovka [Road power plant] / Lyashenko Yu. M., Prudiy A. V., Volkov D. V. No. 2022123633. (In Russ.).

12. Lyashenko Yu. M., Prudiy A. V., Kolesnik M. N. Dorozhnaya energeticheskaya ustanovka s koromyslo-shatunnym preobrazovatelem dvizheniya nazhimnoy platformy [The road power plant with the slider-rocker push plate motion converter] // *Sovremennyye prikladnyye issledovaniya. Contemporary Applied Research*. Novocheerkassk, 2021. Vol. 1. P. 227–231. EDN VXGIKG. (In Russ.).

13. Lyashenko Yu. M., Prudiy A. V. Issledovaniye vliyaniya dvizheniya zven'yev mekhanicheskogo preobrazovatelya dorozhnoy energeticheskoy ustanovki na funktsionirovaniye generatorya [Research into the impact of road power energysystem mechanical converter links motion on generator operation] // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2021. Vol. 21, no 3. P. 41–48. DOI: 10.14529/power210305. (In Russ.).

14. Lukin A. M., Kvaldykov V. V. Teoreticheskaya mekhanika (razdel «Dinamika») [Theoretical mechanics (Dynamics section)]. Omsk, 2008. 372 p. (In Russ.).

15. Perel' L. Ya. Podshipniki kacheniya: raschet, proyektirovaniye i obsluzhivaniye: sprav [Roller bearings: calculations, design, and maintenance: handbook]. Moscow, 1983. 543 p. (In Russ.).

16. Savelyev I. V. Kurs obshchey fiziki. T. 1. V 3 t. Mekhanika [A course of general physics. In 3 vols. Vol. 1. Mechanics]. Saint Petersburg, 2021. 340 p. (In Russ.).

17. Polivanov P. M., Polivanova E. P. Tablitsy dlya podscheta massy detaley i materialov: sprav [Tables for calculating the mass of parts and materials: handbook]. 12th ed., corrected and additional. Moscow, 2003. 304 p. (In Russ.).

PRUDIY Aleksey Vasilyevich, Senior Lecturer of Transport Security and Road Infrastructure Management Department, Shakhty Automobile and Road Construction Institute (branch) Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty.

SPIN-code: 5223-3876

AuthorID (RSCI): 795980

ORCID: 0000-0003-0236-8821

AuthorID (SCOPUS): 57771787400

Correspondence address: prudiy@yandex.ru

LYASHENKO Yuriy Mikhaylovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Transport Security and Road Infrastructure Management Department, Shakhty Automobile and Road Construction Institute (branch) Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Shakhty.

SPIN-code: 7361-3127

AuthorID (RSCI): 862931

ORCID: 0000-0002-6553-0163

AuthorID (SCOPUS): 6603581379

Correspondence address: lumdtn@yandex.ru

For citations

Prudiy A. V., Lyashenko Yu. M. Results of kinetostatic research of road energy harvesting system with slider-rocker mechanism // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 109–115. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-109-115.

Received March 23, 2023.

© A. V. Prudiy, Yu. M. Lyashenko



ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 006.01:621
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-116-124
EDN: RWJCNA

В. И. ГЛУХОВ
Л. Г. ВАРЕПО

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ЕДИНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ. ЧАСТЬ I. ТЕОРИЯ ДВУХ РАЗМЕРОВ МАКСИМУМА И МИНИМУМА

Единая система отсчета геометрических характеристик базируется на классификации соединений прикладной механики, в которой номер класса определяется числом степеней свободы, ограничиваемых сопрягаемыми элементами деталей и получившее краткий термин «информативность». Различная информативность баз элементов, материализующих системы координат, определяет разную информативность осей координат — четыре, две, ноль и разную информативность конструкторских плоскостей — три, две, одну. В работе показано, что информативность элементов в функциях вспомогательных баз и исполнительных элементов определяет число и вид координат (линейных и угловых), с помощью которых необходимо задавать их положение в обобщенной системе координат детали. Показано, что точность координирующих размеров следует задавать симметричными допусками на линейные и угловые размеры.

Ключевые слова: системы координат детали, конструкторские базы, исполнительные элементы, информативность элементов, линейные и угловые координаты, размеры максимума и минимума материала.

I. Введение. Геометрические характеристики являются самыми распространенными в машиностроении, составляя 90–95 % всех измеряемых величин. Качество продукции по точности геометрических характеристик обеспечивается с по-

мощью технических законов, сформулированных в более чем 30 международных стандартах ISO и в таком же количестве в национальных стандартах — российских ГОСТ, американских ASME и ANSI, английских BS, немецких DIN, француз-

ских NF и японских JIS. Следовало ожидать, что Международная организация по стандартизации ISO положит в основу Международного словаря по метрологии VIM [1] свои термины и определения на геометрические характеристики, имея такой солидный вес стандартов и являясь одним из авторов словаря VIM. Ожидания оказались напрасными — в словаре нет понятий «геометрическая характеристика», «допуск величины», а понятия «размер», «система», «элемент» отнесены к неопределимым терминам и заменены синонимами, не применяемыми в стандартах на геометрические характеристики. Без допуска измеряемой величины невозможно узнать, с какой точностью ее следует измерять. ISO почему-то согласилась с отнесением плоского угла к безразмерностным величинам — угол потерял единицу измерения, хотя в стандартах ISO все углы имеют единицу измерения — угловой градус.

Геометрические характеристики деталей базируются на двух физических величинах — длина и угол, которые взаимосвязаны друг с другом, так же как неразделимы два движения объекта в пространстве — линейное поступательное и угловое вращательное, два вида степеней свободы элементов детали — линейные и угловые. Поэтому место угла — рядом с длиной, т.е. в основных физических величинах, а не в производных [2].

Все системы автоматизированного проектирования работают в Декартовой прямоугольной системе координат. Конструирование деталей и сборочных единиц ведется на компьютерах с разработкой электронных 3d-моделей изделий [3] с обязательным изображением систем координат, материализуемых базами. Однако стандарты ISO, разработанные новым техническим комитетом ISO/TC 213 «Геометрические характеристики технических изделий и контроль» [4–8], обходятся без систем координат, обрекая на трудности применения стандартов и конструкторов, и производителей, и исследователей. В результате новые издания справочников [9, 10] по геометрическим характеристикам также не содержат систем координат, декларируя их только в определениях или при контроле на координатно-измерительных машинах. В то же время в международном стандарте Американского общества инженеров-механиков ASME [11] допускается применение систем координат при проектировании сложных изделий для простановки геометрических характеристик и нормирования их точности. В Российском национальном стандарте [12] установлено, что системы координат образуют комплекты баз деталей при проектировании конструкторской документации и во всех других процессах жизненного цикла: производстве, контроле и эксплуатации изделий, с помощью проектных, технологических, измерительных и конструкторских баз.

Многосторонние исследования в области точности геометрических характеристик продолжаются во многих странах мира:

- по формализации геометрической модели допуска [13];

- по включению отклонений формы в метод преобразования матриц для анализа допусков в сборочных единицах [14];

- по классификации операций разбиения деталей на элементы для стандартизации геометрических характеристик и их контроля [15];

- по взаимосвязям геометрических характеристик с характеристиками подшипников скольжения [16];

- по влиянию размерных и геометрических отклонений на внутренний зазор в роликовых подшипниках [17].

Таким образом, дальнейшее повышение качества изделий на основе нормирования точности геометрических характеристик в системах координат является актуальной проблемой.

II. Постановка задач. Многолетние исследования научной школы «Точность геометрических величин» Омского государственного технического университета в рамках научного направления «Стандартизация и метрология» на основе российского стандарта «Базирование и базы в машиностроении» [12] убедили авторов в правильности своего подхода к решению проблемы точности через системы координат, которые материализуются базами деталей. Первая международная публикация на немецком языке [18] была посвящена геометрическим моделям, построенным в системах координат деталей. Основные результаты руководителя научной школы [19] были опубликованы в российских ведущих журналах «Вестник машиностроения» [20] и «Измерительная техника» [21–22], которые переводятся на английский язык в США. Альтернативные принципы стандартизации геометрических характеристик должны быть основаны на инженерных принципах обеспечения качества техники [23]. Открытие различного функционального назначения координатных плоскостей и осей координат прямоугольной Декартовой системы [24] стало поворотным событием для повышения точности расположения геометрических элементов деталей, в том числе деталей подшипников качения [25] и зубчатых колес при 3d-печати [26]. Введение в классификацию геометрических характеристик систем координат, линейных и угловых координирующих размеров потребует не только систематизации матричной модели [27], но и модернизации системы допусков и посадок линейных размеров [28] с передачей симметричного допуска линейным координатам.

Различное назначение плоскостей и осей Декартовой системы координат потребовало уточнения содержания всех геометрических характеристик элементов деталей: координат, размеров, отклонений расположения и формы поверхностей. При геометрическом моделировании учитываются следующие функциональные назначения элементов:

- основная или вспомогательная конструкторская база, материализующие системы координат детали;

- число ограничиваемых базой элемента линейных и угловых степеней свободы детали (информативность элемента);

- исполнительный (рабочий) элемент с нулевой информативностью.

В настоящей работе рассмотрена теория двух размеров максимума и минимума материала элемента детали.

III. Теория двух размеров максимума и минимума материала элемента детали. Согласно теоретической механике, деталь является абсолютно твердым телом. Деталь состоит из совокупности материальных элементов, каждый из которых ограничен одной или несколькими геометрическими поверхностями и предназначен для выполнения одной из функций детали. Не случайно автор научной организации труда и управления производством [29] американский инженер Taylor F.W. назвал наибольший размер наружного элемента (вала) и наи-

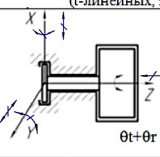
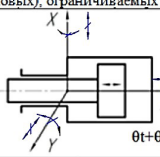
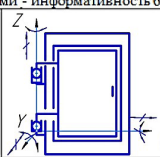
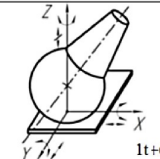
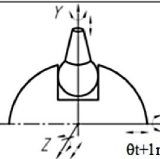
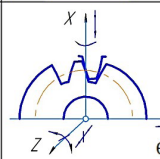
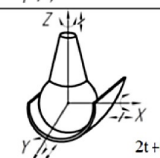
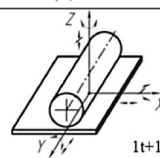
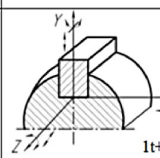
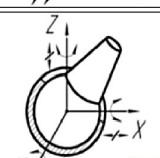
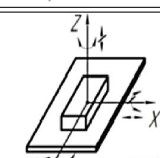
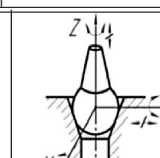
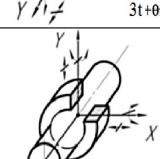
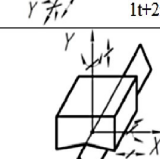
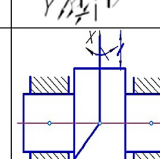
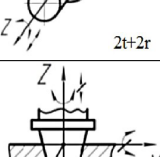
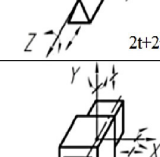
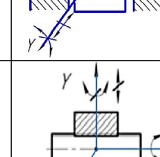
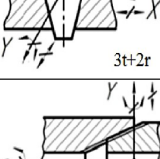
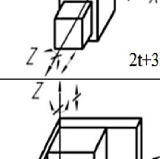
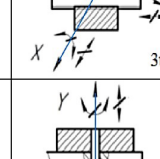
Классы соединений	Соединения основных и вспомогательных конструкторских баз геометрических элементов деталей и число степеней свободы (t-линейных, r-угловых), ограничиваемых базами - информативность баз			Информативность	Инвариантность
0				0	1
I				1	5
II				2	4
III				3	3
IV				4	2
V				5	1
VI				6	0

Рис. 1. Классификация соединений геометрических элементов

меньший размер внутреннего элемента (отверстия) общим термином «размер максимума материала», а наименьший размер вала и наибольший размер отверстия — общим термином «размер минимума материала». Это позволило ему открыть два принципа конструирования калибров для контроля точности размеров элементов:

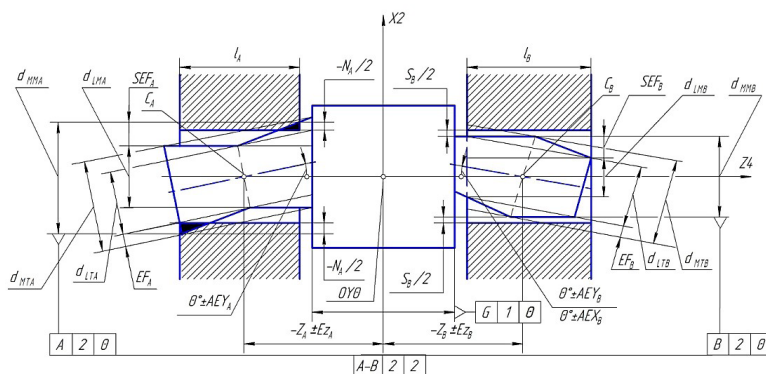
— проходной калибр для контроля размера максимума материала должен иметь геометрическую форму и длину сопряжения присоединяемого элемента;

— непроходной калибр для контроля размера минимума материала должен быть двухточечным.

Два разных вида калибров подтвердили наличие у каждого геометрического элемента двух значений размера, создаваемых отклонениями формы реальной поверхности элемента, которые занимают 20 % ... 60 % от допуска размера. Более того, установлено разное функциональное назначение размеров: размеры максимума материала вала и отверстия в соединении определяют тип посадки — с зазором или с натягом и поэтому их можно считать действительными

размерами элементов, а размеры минимума материала ограничивают отклонения формы элементов в диаметральном выражении и максимальные зазоры или минимальные натяги в соединениях.

Калибры по принципам Тейлора стали составной частью научной организации труда рабочих в процессе контроля продукции, т.к. обеспечивали высокую производительность и точность. Принципы Тейлора открыты в начале двадцатого века (1905), когда Тейлор работал главным контролером сталелитейного завода, на котором литейные заготовки подвергались механической обработке. Позднее на основе принципов Тейлора были разработаны международные стандарты на допуски и посадки линейных размеров, где основными предельными отклонениями допусков являлись размеры максимума материала. Более века продлевают жизнь калибров международные [30] и национальные стандарты. Калибры стали арбитражными средствами контроля. Таким образом, из принципов Тейлора вытекают следующие определения терминов размеров



d_{mT} , d_T – размеры диаметров максимума и минимума материала баз $A2$ и $B2$ вала по Тейлору;
 d_{mH} , d_H – действующие размеры диаметров максимума и минимума материала баз $A2$ и $B2$ вала;
 EF – отклонение формы профиля баз вала (седлообразность базы $A2$ и бочкообразность базы $B2$);
 AEY – угловые отклонения осей баз $A2$ и $B2$ относительно общей базовой оси;
 S, N – зазоры и натяги в сопряжениях;
 SEF – суммарные отклонения формы профиля баз $A2$ и $B2$ вала и угловых отклонений осей баз.

Рис. 2. Модель совместного влияния отклонений расположения и формы профиля комплекта двух цилиндрических базовых элементов вала с информативностью $2inf + 2inf$ на размеры диаметров максимума и минимума материала

максимума и минимума материала геометрического элемента;

— *размер максимум материала* — это линейный размер правильного элемента, прилегающего к поверхности реального элемента вне его материала;

— *размер минимума материала* — это экстремальное расстояние между двумя противоположными точками поверхности реального элемента.

Однако эти определения размеров максимума и минимума материала учитывают только отклонения формы реальных элементов и не учитывают их функциональное назначение, представленное на рис. 1.

Согласно теории машин и механизмов прикладной механики, все геометрические элементы деталей создают пять классов подвижных соединений (I..V), образующих подвижные кинематические пары.

Эти пять классов классификации, дополнены нашей научной школой до семи классов за счёт нулевого класса бесконтактных соединений (θ) и шестого класса неподвижных соединений (VI). Номер класса означает сумму линейных и угловых степеней свободы, сопрягаемые геометрические элементы которых ограничивают соединяемые детали.

Отсчёт ограничиваемых степеней свободы (три линейных и три угловых) возможен только в системах координат, образованных базами базирующей и присоединяемой деталей.

Номер класса определяет новый термин научной школы *информативность геометрического элемента*, то есть такую же сумму ограничиваемых линейных и угловых степеней свободы элемента в функции базы или комплекта баз нескольких элементов, участвующих в материализации системы координат. Термин *информативность* дан геометрическим элементам в противовес термину *инвариантность* в математике, обозначающую сумму степеней свободы, не ограничиваемых поверхностью, что невозможно установить без пространственной системы координат материальной детали, ограничиваемой нематериальными поверхностями.

В рис. 1 показано, что одни и те же геометрические элементы образуют соединения в нескольких классах: от нулевого до седьмого. Это означает,

что геометрические элементы в соединениях ограничивают различное число линейных и угловых степеней свободы сопрягаемых деталей — от нуля до максимально возможного. Следовательно, в соединениях геометрические элементы могут иметь разную информативность, которая будет влиять на посадку в сопряжении через размеры максимума и минимума материала сопрягаемых элементов.

Рассмотрим модель соединения четвертого класса двух цилиндрических элементов $A2$ и $B2$ выполняющих функцию основных конструкторских баз с информативностью $2inf = 2t + \theta r$ каждый и материализующих общую базовую ось $A-B$ вала с информативностью $4inf = 2t + 2r$ (рис. 2), где t — ограничение линейной (поступательной) степени свободы, r — ограничение угловой (вращательной) степени свободы. Общая базовая ось $A-B$ проходит через центры C_A и C_B средних сечений баз $A2$ и $B2$ и материализует первичную ось $Z4$ прямоугольной системы координат с информативностью $4inf = 2t + 2r$. Начало координат 0 образует точка пересечения плоскости симметрии базового призматического элемента $G1$ с осью координат $Z4$.

Поскольку максимальная информативность цилиндрического элемента составляет $4inf = 2t + 2r$, т.к. элемент может ограничивать деталь двух линейных ($2t$) и двух угловых ($2r$) степеней свободы, а на материализацию координатной оси $Z4$ потрачено только по две линейные информативности $2t_A + 2t_B$ баз $A2$ и $B2$, то у каждой базы остались неиспользованными по две угловые информативности $2r$.

Эти информативности вызовут по два угловых поворота (перекоса) осей базовых элементов $A2$ и $B2$ относительно оси координат $Z4$ вокруг осей координат $X2$ и $Y\theta$ с центрами вращения C_A и C_B соответственно: $\theta^\circ \pm AEY_{A'}$, $\theta^\circ \pm AEY_{B'}$, $\theta^\circ \pm AEX_{A'}$, $\theta^\circ \pm AEX_{B'}$ (два последних угловых перекоса располагаются на горизонтальной проекции модели, где ось $X2$ проектирует в точку $0X2$ на оси $Z4$). Таким образом, каждый цилиндрический элемент в функции основной конструкторской базы с информативностью $2inf = 2t + \theta r$ в комплекте двух соосных баз будет иметь два дифференцированных угловых отклонения расположения, которые, по существу, являются

угловыми координатами оси элемента с нулевыми номиналами $\theta^\circ \pm AEY$ и $\theta^\circ \pm AEX$ в материализованной комплектом баз системе координат 0Z4X2Y0. С введением центров C_A и C_B элементов в средних сечениях баз потребуется только по одной линейной координате по оси Z4 для задания положения элементов: $-Z_A \pm EZ_A$ и $Z_B \pm EZ_B$, т.к. ось Z4 проходит через эти центры.

Согласно принципам Тейлора, отклонения формы поверхностей EF_A и EF_B цилиндрических баз A2 и B2 приводят к образованию двух размеров элементов: диаметров максимума материала d_{MTA} и d_{MTB} и диаметров минимума материала d_{LTA} и d_{LTB} . На модели приняты равные значения размеров геометрических характеристик двух баз A2 и B2: $EF_A = EF_B$, $d_{MTA} = d_{MTB}$, $d_{LTA} = d_{LTB}$, $AEY_A = AEY_B$. Различие базовых элементов состоит лишь в отклонениях формы профиля — база A2 имеет седлообразность, а база B2 — бочкообразность. Однако при сопряжении с одинаковыми по диаметру отверстиями только база B2 обеспечивает посадку с зазором S_B , а база A2 вместо посадки с зазором образует посадку с натягом N_A и лишает вал вращения. Следовательно, действующий диаметр максимума материала d_{MMB} базы B2 оказался меньше действующего диаметра максимума материала d_{MMA} базы A2. Именно эти диаметры определяют тип посадки. Причина результатов ясна — бочкообразность формы профиля базы B2 компенсирует угловой перекося оси AEY_B базы. В подшипниках качения применяются только бочкообразные ролики [31].

Седлообразность базы A2 такой компенсацией не обладает, поэтому угловой перекося оси базы AEY_A , равный перекося AEY_B базы B2 относительно их общей базовой оси Z4 в системе координат 0Z4X2Y0, приводит к увеличению действующего диаметра максимума материала d_{MMA} вала по сравнению с диаметром максимума материала d_{MTA} по Тейлору. Угловые перекося осей цилиндрических базовых элементов относительно общей оси нормируются стандартизованными допусками соосности [32] в линейных единицах. Значения допусков угловых отклонений могут выражаться в линейных единицах [33–34] и зависят не от номинальных размеров углов, а от длин образующих углов, т.е. от длин сопряжений баз I_A и I_B в диаметральном выражении или их половин $I_A/2$ и $I_B/2$ — в радиусном.

Все, что сказано о валах, справедливо и для базовых отверстий с аналогичной информативностью, с той разницей, что отклонения расположения уменьшают действующий размер диаметра максимума материала отверстия.

Таким образом, все геометрические характеристики элементов деталей имеют линейно-угловую природу и должны нормироваться в единой обобщенной системе координат, материализованной комплектом баз детали:

- размер максимума материала и размер минимума материала элемента — это размеры двух правильных элементов, номинально расположенных относительно системы координат детали и охватывающих с касанием реальную поверхность элемента: первый — вне материала элемента, касается выступов поверхности, второй — из материала элемента, касается впадин поверхности;

- суммарное отклонение формы реальной поверхности — это положительная полуразность размеров максимума и минимума материала элемента, включающая собственные отклонения формы по-

верхности и отклонения расположения элемента в системе координат детали. По существу — это толщина реальной поверхности элемента.

Заключение

1. Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей базируется на классификации соединений прикладной механики, в которой номер класса определяется числом степеней свободы, ограничиваемых соединяемыми элементами деталей в прямоугольной системе координат. В работе число ограничиваемых элементов степеней свободы детали получило термин «информативность».

2. Первичной геометрической характеристикой детали является обобщенная система координат, материализованная комплектом основных конструкторских баз с суммарной информативностью шесть, определяющих положение детали в изделии за счет ограничения трех линейных и трех угловых степеней свободы детали. В обобщенной системе координат задаются все геометрические характеристики элементов детали.

3. Вторичной геометрической характеристикой детали является вспомогательная система координат для задания положения присоединяемой детали, материализованная комплектом вспомогательных баз с информативностью шесть. Вспомогательная система имеет в обобщенной системе координат детали шесть координат — три линейные точки начала координат и три угловых поворота осей координат. Все шесть координат являются дифференцированными величинами, которые отсчитываются на проекциях координатных плоскостей прямоугольной системы координат.

4. Различная информативность баз элементов, материализующих системы координат, определяет разную информативность осей координат — четыре, две, ноль и разную информативность конструкторских плоскостей — три, две, одну. Столько же координат элемента детали можно задавать относительно координатных плоскостей: одну линейную и две угловые координаты — относительно плоскости с информативностью три, одну линейную и одну угловую — относительно плоскости с информативностью две и одну линейную — относительно плоскости с информативностью одна. Аналогично относительно оси координат с информативностью четыре — две линейные и две угловые координаты, относительно оси с информативностью две — одну линейную и одну угловую координату и относительно оси с информативностью ноль — ни одной координаты.

5. Информативность элементов в функциях вспомогательных баз и исполнительных элементов определяет число и вид координат (линейных и угловых), с помощью которых необходимо задавать их положение в обобщенной системе координат детали. Координирующие размеры полностью заменяют стандартизованные отклонения расположения. Точность координирующих размеров следует задавать симметричными допусками на линейные и угловые размеры.

6. Размерные элементы имеют две геометрические характеристики — размер максимума материала, участвующий в соединении и определяющий тип посадки, и размер минимума материала, ограничивающий отклонения формы поверхностей элемента. Вместе с координирующими размерами, элементные размеры образуют два функциональных вида размеров. Координирующие размеры опреде-

ляют положение элементов в обобщенной системе координат детали, элементные размеры определяют габариты элементов.

Библиографический список

1. ISO/IEC GUIDE 99:2007. International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). URL: <https://www.iso.org/standard/45324.html> (дата обращения: 02.03.2023).
2. ISO 80000-3. Quantities and units – Part 3: Space and time. URL: <https://www.iso.org/standard/64974.html> (дата обращения: 02.03.2023).
3. ISO 10303-203:2011 Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies. URL: <https://www.iso.org/standard/44305.html> (дата обращения: 02.03.2023).
4. ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out. URL: <https://www.iso.org/standard/66777.html> (дата обращения: 02.03.2023).
5. ISO 5459:2011 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Datums and datum systems. URL: <https://www.iso.org/standard/40358.html> (дата обращения: 02.03.2023).
6. ISO 14638:2015 Geometrical product specifications (GPS) — Matrix model. URL: <https://www.iso.org/standard/57054.html> (дата обращения: 02.03.2023).
7. ISO 286-1:2010 Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. URL: <https://www.iso.org/standard/45975.html> (дата обращения: 02.03.2023).
8. ISO 492:2014 Rolling bearings — Radial bearings — Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values. URL: <https://www.iso.org/standard/60356.html> (дата обращения: 02.03.2023).
9. Henzold G. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME standards. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2021. 463 p.
10. Simmons C., Maguire D., Phelps N. Manual of Engineering Drawing (Fifth Edition) — British and International Standards. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2020. 608 p.
11. ASME Y14.5-2009: Dimensioning and Tolerancing. Engineering Drawing and Related Documentation Practices // An international standard. USA, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2009. 215 p.
12. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. Введ. 1977—01—01. Москва: Изд-во стандартов, 1990. 36 с.
13. Leonard P., Pairel E., Giordano M. A Simpler and More Formal Geometric Tolerancing Model // Procedia CIRP. 2013. Vol. 10 (4). P. 30—36. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.009.
14. Serrano-Mira J., Rosado-Castellano P., Romero-Subiryn F. [et al]. Incorporation of form deviations into the matrix transformation method for tolerance analysis in assemblies // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 41. P. 547—554. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.042.
15. Anwer N., Scott P. J., Srinivasan V. Toward a Classification of Partitioning Operations for Standardization of Geometrical Product Specifications and Verification // Procedia CIRP. 2018. Vol. 75. P. 325—330.
16. Hidalgo D., Ruiz R. O., Delgadod A. A novel framework for relationship of manufacturing tolerance and component-level performance of journal bearings // Applied Mathematical Modelling. 2022. Vol. 105. P. 566—583.
17. Alexander Aschenbrenner, Sandro Wartzack A Concept for the Consideration of Dimensional and Geometrical Deviations in the Evaluation of the Internal Clearance of Roller Bearings //

Procedia CIRP 43. 2016. P. 256—261. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.003.

18. Gluchov V. I., Kondashevskij V. V. System zur festlegung von lagetoleranzen werkstückoberflächen // Wissenschaftliche Gesellschaft für Meßtechnik und Automatisierung in der Kammer der Technik: VI Oberflächenkolloquium mit internationaler Beteiligung. D.D.R, Karl-Marx-Stadt, 1984. S. 4/1—4/11.

19. Глухов В. И. Повышение точности измерений в машиностроении на основе введения новых комплексных показателей действительных размеров деталей: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1998. 370 с.

20. Глухов В. И. Комплексные показатели размерной и геометрической точности деталей машин // Вестник машиностроения. 1998. № 4. С. 3—7.

21. Глухов В. И. Методология достоверных измерений размеров деталей // Измерительная техника. 1998. № 5. С. 9—13.

22. Глухов В. И. Координирующие размеры деталей и их измерение // Измерительная техника. 1998. № 7. С. 18—22.

23. Glukhov V. I. Geometrical product specifications: Alternative standardization principles, coordinate systems, models, classification and verification // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. 2014. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005655.

24. Glukhov V. I., Ivleva I. A., Zlatkina O. Y. Geometrical product specifications. Datums and coordinate systems // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 858 (1). 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012013.

25. Glukhov V. I., Pushkarev V. V., Khomchenko V. G. Geometric modeling in the problem of ball bearing accuracy // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 858 (1). 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012014.

26. Glukhov V. I., Varepo L. G., Nagornova I. V., Doronin F. A. Strength and geometry parameters accuracy improvement of 3D-printed polymer gears // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260 (3). 032019 DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032019.

27. Glukhov V. I., Varepo L. G., Shalay V. V., Grinevich V. A. New matrix for geometrical product specifications on coordinate basis // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441 (1). 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012061.

28. Glukhov V. I., Grinevich V. A., Shalay V. V. The linear sizes tolerances and fits system modernization // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 998. (1). 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/998/1/012012.

29. Taylor F. W. The Principles of Scientific Management. New York; London: Harper, 1911. 144 p.

30. ISO 1938-1:2015 Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional measuring equipment — Part 1: Plain limit gauges of linear size. URL: <https://www.iso.org/standard/41132.html> (дата обращения: 02.03.2023).

31. ГОСТ 22696-77. Подшипники качения. Ролики цилиндрические короткие. Технические требования. Введ. 1979—01—01. Москва: Изд-во стандартов, 1982. 16 с.

32. ГОСТ 24643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. Введ. 1981—06—30. Москва: Изд-во стандартов, 2004. 10 с.

33. ГОСТ 8908-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные углы и допуски углов. Введ. 1981—06—22. Москва: Изд-во стандартов, 1981. 16 с.

34. ГОСТ 2.412-81. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий. Введ. 1983—01—01. Москва: Стандартинформ, 2011. 16 с.

ГЛУХОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология»

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

SPIN-код: 3101-0639

ORCID: 0000-0002-4513-3291

AuthorID (SCOPUS): 56503382500

ResearcherID: Q-2030-2016

ВАРЕПО Лариса Григорьевна, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4980-6679

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

Адрес для переписки: larisavarepo@yandex.ru

Для цитирования

Глухов В. И., Варепо Л. Г. Единая система отсчета геометрических характеристик размерных элементов деталей. Часть I. Теория двух размеров максимума и минимума // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 116–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-116-124.

Статья поступила в редакцию 15.03.2023 г.

© В. И. Глухов, Л. Г. Варепо

UNIFIED REFERENCE SYSTEM FOR GEOMETRIC CHARACTERISTICS DIMENSIONAL ELEMENTS OF DETAILS. PART I. THE THEORY OF TWO DIMENSIONS MAXIMUM AND MINIMUM

A unified reference system for geometric characteristics is based on the classification of joints of applied mechanics, in which the class number is determined by the number of degrees of freedom limited by mating elements of parts and has received the short term «informativeness». Different information content of the bases of elements that materialize coordinate systems determines different information content of the coordinate axes – four, two, zero and different information content of design planes – three, two, one. The paper shows that the information content of elements in the functions of auxiliary bases and executive elements determines the number and type of coordinates (linear and angular), with the help of which it is necessary to set their position in the generalized coordinate system of the part. It is shown that the accuracy of coordinating dimensions should be specified by symmetrical tolerances for linear and angular dimensions.

Keywords: workpiece coordinate systems, design bases, actuating elements, informativeness of elements, linear and angular coordinates, dimensions of material maximum and minimum.

References

1. ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM). URL: <https://www.iso.org/standard/45324.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
2. ISO 80000-3 Quantities and units – Part 3: Space and time. URL: <https://www.iso.org/standard/64974.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
3. ISO 10303-203:2011 Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies. URL: <https://www.iso.org/standard/44305.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
4. ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. URL: <https://www.iso.org/standard/66777.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
5. ISO 5459:2011 Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems. URL: <https://www.iso.org/standard/40358.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
6. ISO 14638:2015 Geometrical product specifications (GPS) – Matrix model. URL: <https://www.iso.org/standard/57054.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
7. ISO 286-1:2010 Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. URL: <https://www.iso.org/standard/45975.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
8. ISO 492:2014 Rolling bearings – Radial bearings – Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values. URL: <https://www.iso.org/standard/60356.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
9. Henzold G. Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME standards. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2021. 463 p. (In Engl.).
10. Simmons C., Maguire D., Phelps N. Manual of Engineering Drawing (Fifth Edition) – British and International Standards. 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2020. 608 p. (In Engl.).
11. ASME Y14.5-2009: Dimensioning and Tolerancing. Engineering Drawing and Related Documentation Practices // An international standard. USA, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2009. 215p. (In Engl.).
12. GOST 21495-76. Bazirovaniye i bazy v mashinostroyenii. Terminy i opredeleniya [Locating and bases in machine building industry. Terms and definitions]. Moscow, 1990. 36 p. (In Russ.).
13. Leonard P., Pairel E., Giordano M. A Simpler and More Formal Geometric Tolerancing Model // Procedia CIRP. 2013. Vol. 10 (4). P. 30–36. DOI: 10.1016/j.procir.2013.08.009. (In Engl.).
14. Serrano-Mira J., Rosado-Castellano P., Romero-Subiryn F. [et al]. Incorporation of form deviations into the matrix transformation method for tolerance analysis in assemblies // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 41. P. 547–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.09.042. (In Engl.).
15. Anwer N., Scott P. J., Srinivasan V. Toward a Classification of Partitioning Operations for Standardization of Geometrical Product Specifications and Verification // Procedia CIRP. 2018. Vol. 75. P. 325–330. (In Engl.).

16. Hidalgo D., Ruiz R. O., Delgadod A. A novel framework for relationship of manufacturing tolerance and component-level performance of journal bearings // *Applied Mathematical Modelling*. 2022. Vol. 105. P. 566–583. (In Engl.).
17. Aschenbrenner A., Wartzack S. A Concept for the Consideration of Dimensional and Geometrical Deviations in the Evaluation of the Internal Clearance of Roller Bearings // *Procedia CIRP* 43. 2016. P. 256–261. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.003. (In Engl.).
18. Glukhov V. I., Kondashevskij V. V. System zur festlegung von lagetoleranzen werkstückoberflächen // *Wissenschaftliche Gesellschaft für Meßtechnik und Automatisierung in der Kammer der Technik: VI Oberflächenkolloquium mit internationaler Beteiligung*. D.D.R., Karl-Marx-Stadt, 1984. S. 4/1–4/11. (In Germ.).
19. Glukhov V. I. Povysheniye tochnosti izmereniy v mashinostroyenii na osnove vvedeniya novykh kompleksnykh pokazateley deystvitel'nykh razmerov detaley [Improvement of measurement accuracy in mechanical engineering through the introduction of new complex measures of actual part dimensions]. Moscow, 1998. 370 p. (In Russ.).
20. Glukhov V. I. Kompleksnyye pokazateli razmernoy i geometricheskoy tochnosti detaley mashin [Comprehensive dimensional indicators and geometric accuracy figures for machine parts] // *Vestnik mashinostroyeniya. Vestnik Mashinostroyeniya*. 1998. No. 4. P. 3–7. (In Russ.).
21. Glukhov V. I. Metodologiya dostovernykh izmereniy razmerov detaley [Methodology for reliable measurement of workpiece dimensions] // *Izmeritel'naya tekhnika. Metrology*. 1998. No. 5. P. 9–13. (In Russ.).
22. Glukhov V. I. Koordiniruyushchiye razmery detaley i ikh izmereniye [Coordinate part dimensions and their measurement] // *Izmeritel'naya tekhnika. Metrology*. 1998. No. 7. P. 18–22. (In Russ.).
23. Glukhov V. I. Geometrical product specifications: Alternative standardization principles, coordinate systems, models, classification and verification // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics*. 2014. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005655. (In Engl.).
24. Glukhov V. I., Ivleva I. A., Zlatkina O. Y. Geometrical product specifications. Datums and coordinate systems // *Journal of Physics Conference Series*. 2017. Vol. 858 (1). 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012013. (In Engl.).
25. Glukhov V. I., Pushkarev V. V., Khomchenko V. G. Geometric modeling in the problem of ball bearing accuracy // *Journal of Physics Conference Series*. 2017. Vol. 858 (1). 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012014. (In Engl.).
26. Glukhov V. I., Varepo L. G., Nagornova I. V., Doronin F. A. Strength and geometry parameters accuracy improvement of 3D-printed polymer gears // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260 (3). 032019. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032019. (In Engl.).
27. Glukhov V. I., Varepo L. G., Shalay V. V., Grinevich V. A. New matrix for geometrical product specifications on coordinate basis // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441 (1). 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012061. (In Engl.).
28. Glukhov V. I., Grinevich V. A., Shalay V. V. The linear sizes tolerances and fits system modernization // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 998. (1). 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/998/1/012012. (In Engl.).
29. Taylor F. W. *The Principles of Scientific Management*. New York; London: Harper, 1911. 144 p. (In Engl.).
30. ISO 1938-1:2015 Geometrical product specifications (GPS) – Dimensional measuring equipment – Part 1: Plain limit gauges of linear size. URL: <https://www.iso.org/standard/41132.html> (accessed: 02.03.2023). (In Engl.).
31. COST 22696-77. Podshipniki kacheniya. Roliki tsilindricheskiye korotkiye. Tekhnicheskiye trebovaniya [Rolling bearings. Short cylindrical rollers. Technical requirements]. Moscow, 1982. 16 p. (In Russ.).
32. COST 24643-81. Osnovnyye normy vzaimozamenyayemosti. Dopuski formy i raspolozheniya poverkhnostey. Chislovyye znacheniya [Basic norms of interchangeability. Tolerances of form and position of surfaces. Numerical values]. Moscow, 2004. 10 p. (In Russ.).
33. COST 8908-81. Osnovnyye normy vzaimozamenyayemosti. Normal'nyye ugly i dopuski uglov [Basic norms of interchangeability. Standart angles and angle tolerances]. Moscow, 1981. 16 p. (In Russ.).
34. COST 2.412-81. Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Pravila vypolneniya chertezhey i skhem opticheskikh izdeliy [Unified system for design documentation. Rules for making drawings and diagrams of optical products]. Moscow, 2011. 16 p. (In Russ.).

GLUKHOV Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 3101-0639

ORCID: 0000-0002-4513-3291

AuthorID (SCOPUS): 56503382500

ResearcherID: Q-2030-2016

VAREPO Larisa Grigorievna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4980-66-79

ORCID: 0000-0001-5366-2700

AuthorID (SCOPUS): 6507043152

ResearcherID: B-1163-2015

Correspondence address: larisavarepo@yandex.ru

For citations

Glukhov V. I., Varepo L. G. Unified reference system for geometric characteristics dimensional elements of details. Part I. The theory of two dimensions maximum and minimum // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 116–124. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-116-124.

Received March 15, 2023.

© V. I. Glukhov, L. G. Varepo

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для определения состава неоднородных образцов с помощью метода лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии используются градуировочные зависимости, которые могут иметь значительные систематические погрешности, существенно влияющие на определение количественного состава элементов. Неоднородность образцов также вызывает погрешности в параллельных измерениях. Для снижения погрешностей используются методы многосигнальной градуировки и внутреннего стандарта, которые позволяют существенно повысить точность при изменении условий проведения эксперимента и исключить необходимость покупки дорогостоящих стандартных образцов.

Ключевые слова: бетон, продукты коррозии, атомно-эмиссионный спектральный анализ, лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия, градуировочный график, составляющие погрешности, функция устойчивого градуирования.

Введение. Железобетонные конструкции (ЖБК) используются в опорах контактной сети электропитания железнодорожного транспорта. Особенностью данной системы является протяженность, поэтому важным является применение мобильных диагностических комплексов, позволяющих определять коррозионное состояние ЖБК как основного параметра, влияющего на надежность опор. Актуальным является использование спектральных методов диагностирования. Для определения состава образцов с помощью спектральных методов, в частности метода лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС), наиболее распространены подходы с использованием градуировочных зависимостей. Но градуировочные графики, построенные по одним комплектам стандартных образцов, изменяют своё положение в различное время с изменением условий проведения эксперимента, что вызывает значительные систематические погрешности в конечном результате определения количественного состава анализируемых элементов. Кроме того, составляющие погрешности возникают от неоднородности состава по объему анализируемых образцов.

Теория. Метод лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (в частности, атомно-эмиссионный метод с индуктивно-связанной плазмой или атомно-эмиссионный спектральный анализ — АЭСА) обладает более широким динамическим диапазоном по сравнению с другими методами [1, 2]. Данный метод позволяет проводить измерения количественного состава анализируемых продуктов даже в том случае, когда в лаборатории нет необходимых стандартных образцов (СО) или они не охватывают все интересные элементы-примеси.

В АЭСА, как и в любом другом методе, присутствуют погрешности определения количественного содержания элемента [3].

Основными источниками систематических погрешностей определения в АЭСА являются:

- влияние матричного состава пробы на интенсивность спектральных линий определяемых элементов;
- спектральные помехи;
- погрешности градуировки.

К источникам общих случайных кратковременных погрешностей в АЭСА относят:

- нестабильность системы ввода пробы;

- нестабильность газовых потоков;
- нестабильность термохимических процессов в источнике возбуждения спектров;
- нестабильность системы регистрации сигнала (малый вклад);
- неоднородность состава исследуемых образцов.

Источником случайной долговременной погрешности является дрейф сигнала.

Существуют различные методы снижения погрешностей (систематических и случайных) при определении количественного состава элементов методом атомно-эмиссионного спектрального анализа. Основными направлениями являются:

- оптимизация градуировки;
- совершенствование аппаратуры подачи и подготовки пробы, а также аппаратуры возбуждения спектров и регистрации сигналов;
- оптимизация параметров измерения сигналов;
- многократные измерения сигнала с оптимальным временем интегрирования;
- многолинейчатая регистрация интенсивностей анализируемых элементов;
- учет дрейфа сигнала;
- коррекция фона, учет контрольного опыта и спектральных помех;
- использование внутренней и внешней стандартизации;
- одновременная многоканальная регистрация сигналов.

Постановка задачи. Использование метода внутреннего стандарта [4–6] полагается наиболее эффективным и наименее затратным как по стоимости, так и по времени, а одновременное регистрирование нескольких спектральных линий сравнения, которая положена в основу многолинейчатого метода внутреннего стандарта, обеспечивает [3, 7, 8]:

- минимизирование вероятности возникновения систематических погрешностей от матричных спектральных и неспектральных помех;
- возможность выбора наиболее подходящих линий для повышения точности анализа;
- возможность при сложении интенсивностей повысить чувствительность определения и улучшить точность анализа в несколько раз.

Нелинейность градуировочного графика вблизи предела обнаружения примеси обусловлена содер-

жанием этой примеси в основе образца сравнения (ОС). К таким примесям относятся элементы с физико-химическими свойствами, близкими с основной и потому трудно удаляемые, так называемые «распространенные элементы», например, Al, Ca, Fe, Mg, K, Na, Si и др. [9]

Корреляционные зависимости (1) являются наиболее распространенными для анализа продуктов коррозии в бетоне методом АЭСА:

$$Y = AX + B, \quad (1)$$

где Y — отношение интенсивности аналитических сигналов калия или натрия к интенсивности спектральной линии Si 243,88 нм (внутренний стандарт); X — массовая доля элемента, %; A и B — параметры уравнения [10].

В работе [10] в качестве внутреннего стандарта выступила линия кремния (Si) 243,88 нм и комбинации линий основных и примесных элементов с оптимизируемыми весовыми коэффициентами [11]:

$$I_{\text{вн.ст}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{базис}}} a_j I_i, \quad (2)$$

где I_i — интенсивность аналитического сигнала основных компонентов; $I_{\text{вн.ст}}$ — сигнал внутреннего стандарта; a_j — оптимизируемые весовые коэффициенты; i — порядковый номер аналитической линии; $n_{\text{базис}}$ — общее количество используемых спектральных линий; j — обозначение принадлежности к определяемому элементу.

Отклонение точек от градуировочных графиков происходит в основном из-за наличия двух факторов [10]:

- наличие случайных погрешностей самих методик АЭСА;
- неадекватность (различие фазового и гранулометрического состава проб) образцов сравнения.

Эксперимент. Изменение площади поперечного сечения арматурных стержней играет основную роль в обеспечении прочностных характеристик железобетонных опор, поддерживающих линии электропередач или контактного провода на железнодорожном транспорте. Для построения и анализа градуировочных зависимостей были изготовлены образцы сравнения, изготовленные из материала, соответствующего реальным железобетонным кон-

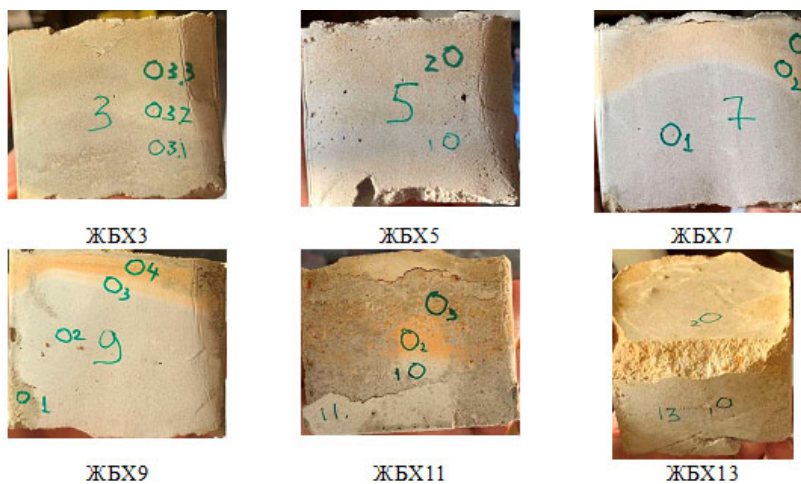


Рис. 1. Изображения поверхности бетонных образцов с различным содержанием FeCl_3

Таблица 1

Образцы сравнения с известным содержанием раствора $FeCl_3$

Обозначение	Масса образца в сыром виде, г	Масса $FeCl_3$, г	$C(FeCl_3)$, %	$C(Fe)$, %
ЖБХ3	496	5	1,0	0,34
ЖБХ5	539	10	1,9	0,65
ЖБХ7	505	15	3,0	1,03
ЖБХ9	492	20	4,1	1,41
ЖБХ11	498	25	5,0	1,72
ЖБХ13	464	36,2	7,8	2,69

Таблица 2

Основные характеристики лазерного анализатора LIBZ-300

Параметр	Значение
Диапазон спектральной чувствительности, нм	190 – 950
Источник возбуждения, Мдж/импульс	5 – 6
Частота повторения, Гц	50
Лазерный источник, нм	1064
Область растривания	16×16 точек, 256 местоположений
Диаметр луча лазера, мкм	~ 50
Передвижение лазера в направлении XY	есть
Регулировка фокуса в направлении Z	есть
Сбор спектральных данных	в режиме открытого или закрытого строба
Передача данных	Wifi, Bluetooth, USB подключение к любым электронным устройствам, включая программное обеспечение SciAps ProfileBuilder для ПК, MAC.
Управляющая электроника: процессор	ARM Cortex-A9 dual-core / 1,2 GHz Память: 1 GB DDR2 RAM, 1 GB NAND
Дисплей	5-дюймовый цветной тачскрин дисплей с поддержкой PowerVR SGX540 3D graphic
Видео/фото документирование	встроенная фото- и видеокамера для просмотра образца до/во время анализа для уточнения местоположения
Питание	литий-ионная батарея, сеть
Вес (с батареями), кг	1,9
Габариты	8,25"×11,5"×4,5" (~ 21×29×11,5 см)

струкциям (бетон М300, применяемый в опорах контактной сети) с заданным количеством хлорида железа ($FeCl_3$) в бетоне, имитирующего разложение арматурных стержней (рис. 1).

На фотографиях образцов окружностями указаны области, в которых находились точки измерения. Каждая точка, показанная на рис. 1, имеет

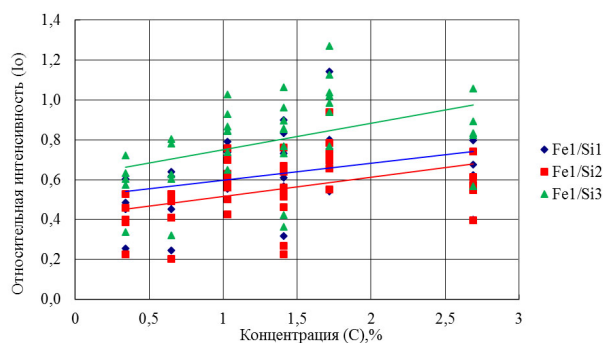


Рис. 2. Градуировочный график по результатам эксперимента образцов ЖБХ

различия в содержании $FeCl_3$ (неоднородность состава ОС).

Как видно из рис. 1, образцы имеют неравномерное распределение хлорида железа в объеме, поэтому для повышения однородности исследуемых образцов, с поверхности набирался порошок из взаимно перпендикулярных продорожек. Порошок измельчался и прессовался в таблетки при помощи ручного пресса.

Содержание хлорида железа, масса образцов и их наименование приведены в табл. 1.

Исследование проводилось с использованием лазерного анализатора LIBZ-300 (SciAps, США) геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Основные характеристики прибора приведены в табл. 2. Режим съемки: 12 позиций лазера (площадь пятна примерно 0,25 мм²), 3 чистящих импульса, 8 аналитических. Продувка осуществляется аргоном. Задержка фотоматрицы не использовалась.

В качестве основной линии была использована линия железа Fe_1 259,94 нм, а в качестве линий сравнения были использованы линии кремния Si_1 288,16 нм, Si_2 251,61 нм, Si_3 252,85 нм. По результатам эксперимента был построен градуировочный график (рис. 2) зависимости относительной интенсивности от концентрации железа. Величина достоверности аппроксимации по параметру R^2 составляет 0,092; 0,154 и 0,170 соответственно линиям сравнения. Для линий железа Fe_2 263,08 нм и Fe_3 302,06 нм графики отличаются незначительно друг от друга и имеют значительные разбросы для измеренных интенсивностей по каждому образцу сравнения.

Для повышения стабильности и уменьшения временного дрейфа градуировочных графиков были измерены несколько линий анализируемого элемента (многолинейчатая градуировка) и несколько линий сравнения, имеющих различные энергетические характеристики, для уменьшения влияния внешних факторов на проведение эксперимента.

Для построения градуировочного графика необходимо рассчитать регрессионные коэффициенты функции устойчивого градуирования:

$$F = \frac{a_1 \cdot I_{Fe}}{b_1 \cdot I_{Si_1} + b_2 \cdot I_{Si_2} + b_3 \cdot I_{Si_3}}, \quad (3)$$

где I_{Fe_1} — интенсивность спектральной линии анализируемого элемента (Fe 259,94 нм); $I_{Si_1}, I_{Si_2}, I_{Si_3}$ — интенсивности линий сравнения с длинами волн 288,16 нм, 251,61 нм, 252,85 нм соответственно; a_1, b_1, b_2, b_3 — весовые коэффициенты.

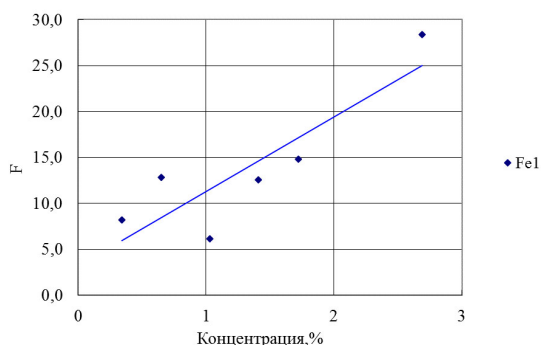


Рис. 3. График функции устойчивого градуирования

Для формирования градуировочной зависимости (с использованием функции устойчивого градуирования) требуется рассчитать коэффициенты, при которых корреляция между данными, полученными в разных режимах, будет максимальной [12].

По результатам вычисления функции (3) был построен график устойчивого градуирования, где величина достоверной аппроксимации R^2 составляет 0,829 (рис. 3). Кроме того, для предложенного способа градуирования отмечено повышение концентрации чувствительности

$$k = \frac{\Delta Y}{\Delta X},$$

где $\Delta Y = Y_{\max} - Y_{\min}$, $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$ — координаты изменения начальной и конечной точек на градуировочном графике.

Так, для данных, приведенных на рис. 2 и рис. 3, изменение коэффициента концентрационной чувствительности произошло от значения $k = 0,13$ до значения $k = 8,25$ для традиционного и предложенного способа градуирования. Добиться существенного уменьшения погрешностей параллельных измерений предложенным способом не удалось, на графике рис. 3 они не показаны.

Обсуждение результатов эксперимента. Применение метода многосигнальной градуировки с использованием внутреннего стандарта позволяет существенно повысить точность при изменении условий проведения эксперимента и снизить затраты, т.к. нет необходимости в использовании дорогостоящих стандартных образцов для корректировки положения градуировочных зависимостей. Отмечено повышение концентрационной чувствительности предложенного способа градуирования.

Библиографический список

1. Пелевина Н. Г. Применение метода внутреннего стандарта для определения примесей в цинке марочном и катодном методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 8. С. 24–26.
2. Grotti M., Magi E., Leardi R. Selection of Internal Standards in Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry by Principal Component Analysis / J. Anal. At. Spectrom. 2003. Vol. 18, № 3. P. 274–281. DOI: 10.1039/b212653b.
3. Пупышев А. А. О возможности снижения систематических и случайных погрешностей атомно-эмиссионного спектрального анализа с использованием многолинейчатой градуировки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 1-2. С. 20–30.

4. Moore G. L. Internal standardization in atomic-emission spectrometry using inductively coupled plasma. Report N M208. Mintek (Analytical Science Division); Council for mineral technology (South Africa), 1985. 24 p.

5. Barnett W. B., Fassel V. A., Kniseley R. N. Theoretical principles of internal standardization in analytical emission spectroscopy // Spectrochim. Acta. Part B. 1968. Vol. 23. P. 643–664.

6. Barnett W. B., Fassel V. A., Kniseley R. N. An experimental study of internal standardization in analytical emission spectroscopy // Spectrochim. Acta. Part B. 1970. Vol. 25. P. 139–161.

7. Kucharkowski R., Jankova D., Herrmann E., John A. Contributions to accuracy improvement of simultaneous ICP atomic emission spectrometry using multi-line measurements of analyte and internal standard elements Applications for the analysis of permalloy // Fresenius J. Anal. Chem. 1998. Vol. 361. P. 532–539.

8. Pan F., Tyson J. F. Real and composite emission lines as internal standards in the determination of As, Se and Sb by inductively coupled plasma optical emission spectrometry // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2007. Vol. 22. P. 377–385. DOI: 10.1039/b613316a.

9. Чанышева Т. А., Путьмаков А. Н., Шелпакова И. Р. К вопросу о построении градуировочных графиков в практике атомно-эмиссионного спектрального анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Специальный выпуск. 2007. Т. 73. С. 80–85.

10. Змитрович А. Г., Пупышев А. А. Атомно-эмиссионное спектральное определение оксидов натрия и калия в порошках микрокремнезёма способом вдувания // Аналитика и контроль. 2012. Т. 16, № 1. С. 23–29.

11. Змитрович А. Г., Пупышев А. А. Оптимизация градуировочных зависимостей при атомно-эмиссионном спектральном анализе многокомпонентных ферросплавов способом вдувания в дуговой разряд // Проблемы спектроскопии и спектрометрии: межвуз. сб. науч. тр. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. Вып. 16. С. 33–44.

12. Кузнецов А. А., Слептеров В. А., Пелезнев А. В. Реализация мобильных градуировочных характеристик приборов спектрального анализа материалов с использованием виртуальных эталонов // Омский научный вестник. 2013. № 3 (125). С. 241–246.

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

ORCID: 0000-0002-1815-4679

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

ВОЛКОВА Наталия Владимировна, соискатель кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 3882-5087

AuthorID (РИНЦ): 1044951

ORCID: 0000-0003-4645-9661

AuthorID (SCOPUS): 57217279867

Адрес для переписки: wolf.volkova@yandex.ru

ФОМИЧЕНКО Кирилл Игоревич, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5140-4206

AuthorID (РИНЦ): 1118770

ORCID: 0000-0001-5836-2395

AuthorID (SCOPUS): 57223102995
 Адрес для переписки: fomichenko.kiril@gmail.com
КОРШУНОВ Дмитрий Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, техник кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва.
 SPIN-код: 3118-6460
 AuthorID (РИНЦ): 1118067
 ORCID: 0000-0002-8500-7193
 AuthorID (SCOPUS): 57221109159
 Адрес для переписки: dmit0korsh@gmail.com

Для цитирования

Кузнецов А. А., Волкова Н. В., Фомиченко К. И., Коршунов Д. М. Повышение точности определения продуктов коррозии в железобетонных конструкциях методом атомно-эмиссионного спектрального анализа // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 125–130. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-125-130.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023 г.
 © А. А. Кузнецов, Н. В. Волкова, К. И. Фомиченко, Д. М. Коршунов

UDC 681.2:543.423
 DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-125-130
 EDN: TTTPLT

A. A. KUZNETSOV¹
N. V. VOLKOVA¹
K. I. FOMICHENKO¹
D. M. KORSHUNOV²

¹ Omsk State
 Transport University,
 Omsk, Russia

² Lomonosov Moscow
 State University,
 Moscow, Russia

IMPROVING THE ACCURACY OF DETERMINING CORROSION PRODUCTS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY ATOMIC EMISSION SPECTRUM ANALYSIS

To determine the composition of inhomogeneous samples using the method of laser-spark emission spectrometry, calibration dependences are used, which can have significant systematic errors that significantly affect the determination of the quantitative composition of elements. Sample inhomogeneity also causes inaccuracies in replicate measurements. To reduce errors, multi-signal calibration and internal standard methods are used, which can significantly improve accuracy when changing experimental conditions and eliminate the need to purchase expensive standard samples.

Keywords: concrete, corrosion products, atomic emission spectral analysis, laser-induced breakdown spectroscopy, calibration graph, error components, stable calibration function.

References

1. Pelevina N. G. Primeneniye metoda vnutrennego standarta dlya opredeleniya primesey v tsinke marochnom i katodnom metodom atomno-emissionnoy spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy [Application of interior standard method for impurities determination in branded and cathode zinc by atomic-emission spectrometry with inductive bounded plasma] // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2006. Vol. 72, no. 8. P. 24–26. (In Russ.).
2. Grotti M., Magi E., Leardi R. Selection of Internal Standards in Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry by Principal Component Analysis / *J. Anal. At. Spectrom.* 2003. Vol. 18, no. 3. P. 274–281. DOI: 10.1039/b212653b. (In Engl.).
3. Pupyshv A. A. O vozmozhnosti snizheniya sistemicheskikh i sluchaynykh pogreshnostey atomno-emissionnogo spektral'nogo analiza s ispol'zovaniyem mnogolineyachatoy graduirovki [On the possibility of reducing the systematic and random errors of atomic emission spectral analysis using multiline calibration] Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2017. Vol. 83, no. 1-2. P. 20–30. (In Russ.).
4. Moore G. L. Internal standardization in atomic-emission spectrometry using inductively coupled plasma. Report N

M208. Mintek (Analytical Science Division): Council for mineral technology (South Africa), 1985. 24 p. (In Engl.).

5. Barnett W. B., Fassel V. A., Kniseley R. N. Theoretical principles of internal standardization in analytical emission spectroscopy // *Spectrochim. Acta. Part B*. 1968. Vol. 23. P. 643–664. (In Engl.).

6. Barnett W. B., Fassel V. A., Kniseley R. N. An experimental study of internal standardization in analytical emission spectroscopy // *Spectrochim. Acta. Part B*. 1970. Vol. 25. P. 139–161. (In Engl.).

7. Kucharkowski R., Jankova D., Herrmann E., John A. Contributions to accuracy improvement of simultaneous ICP atomic emission spectrometry using multi-line measurements of analyte and internal standard elements Applications for the analysis of permalloy // *Fresenius J. Anal. Chem.* 1998. Vol. 361. P. 532–539. (In Engl.).

8. Pan F., Tyson J. F. Real and composite emission lines as internal standards in the determination of As, Se and Sb by inductively coupled plasma optical emission spectrometry // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2007. Vol. 22. P. 377–385. DOI: 10.1039/b613316a. (In Engl.).

9. Chanyshева T. A., Putmakov A. N., Shelpakova I. R. K voprosu o postroyenii graduirovannykh grafikov v praktike atomno-emissionnogo spektral'nogo analiza [On the issue of constructing calibration curves in the practice of atomic emission spectral analysis] // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Spetsial'nyy vypusk. Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. Special Issue*. 2007. Vol. 73. P. 80–85. (In Russ.).

10. Zmitrevich A. G., Pupyshev A. A. Atomno-emissionnoye spektral'noye opredeleniye oksidov natriya i kaliya v poroshkakh mikrokremerzama sposobom vduvaniya [Atomic emission spectral determination of sodium and potassium oxides in micrisilica powders using the injection method] // *Analitika i kontrol'. Analytics and Control*. 2012. Vol. 16, no. 1. P. 23–29. (In Russ.).

11. Zmitrevich A. G., Pupyshev A. A. Optimizatsiya graduirovannykh zavisimostey pri atomno-emissionnom spektral'nom analize mnogokomponentnykh ferrosplavov sposobom vduvaniya v dugovoy razryad [Optimization of Calibration Dependencies in Atomic Emission Spectral Analysis of Multicomponent Ferroalloys by the Method of Injection into an Arc Discharge] // *Problemy spektroskopii i spektrometrii. Problemy Spektroskopii i Spektrometrii*. Ekaterinburg, 2004. Issue 16. P. 33–44. (In Russ.).

12. Kuznetsov A. A., Slepterev V. A., Peleznev A. V. Realizatsiya mobil'nykh graduirovannykh kharakteristik priborov spektral'nogo analiza materialov s ispol'zovaniyem virtual'nykh etalonov [Implementation of mobile calibration characteristics of devices for spectral analysis of materials using virtual standards]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2013. No. 3 (125). P. 241–246. (In Russ.).

KUZNETSOV Andrey Albertovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5259-0531

AuthorID (RSCI): 358976

ORCID: 0000-0002-1815-4679

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Correspondence address: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

VOLKOVA Nataliia Vladimirovna, Applicant of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 3882-5087

AuthorID (RSCI): 1044951

ORCID: 0000-0003-4645-9661

AuthorID (SCOPUS): 57217279867

Correspondence address: wolf.volkova@yandex.ru

FOMICHENKO Kirill Igorevich, Graduate Student of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 5140-4206

AuthorID (RSCI): 1118770

ORCID: 0000-0001-5836-2395

AuthorID (SCOPUS): 57223102995

Correspondence address: fomichenko.kiril@gmail.com

KORSHUNOV Dmitry Mikhailovich, Candidate of Geology and Mineralogy Sciences, Technician of Geology, Geochemistry and Economics of Mineral Resources Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow.

SPIN-code: 3118-6460

AuthorID (RSCI): 1118067

ORCID: 0000-0002-8500-7193

AuthorID (SCOPUS): 57221109159

Correspondence address: dmit0korsh@gmail.com

For citations

Kuznetsov A. A., Volkova N. V., Fomichenko K. I., Korshunov D. M. Improving the accuracy of determining corrosion products in reinforced concrete structures by atomic emission spectrum analysis // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 125–130. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-125-130.

Received April 27, 2023.

© A. A. Kuznetsov, N. V. Volkova, K. I. Fomichenko, D. M. Korshunov

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Работа посвящена задаче детального исследования погрешности бесконтактных измерений температуры в диапазоне 100–600 °С, вызванной неустрашимым влиянием поглощения теплового излучения объекта атмосферными парами воды в условиях промышленности. С использованием базы данных молекулярной спектроскопии HITRAN в работе было проведено моделирование четырех измерительных ситуаций, характеризующихся различными уровнями влажности и дистанциями «объект-пирометр», для 11-ти измерительных пирометрических каналов с уникальными спектральными диапазонами чувствительности. Как показало проведенное исследование, пренебрежение эффектом поглощения излучения объекта атмосферными парами воды при проведении бесконтактных температурных измерений может привести к заметному отклонению их результатов от истинных значений даже на относительно небольших дистанциях (5–10 м).

Ключевые слова: бесконтактные измерения температуры, пирометр, тепловизор, атмосферные газы, водяной пар, относительная влажность, молекулярное поглощение, база данных HITRAN.

Введение. В настоящее время развитие и внедрение общей концепции и подходов четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) приводит к появлению все большего числа кибер-физических систем с элементами искусственного интеллекта, что, в частности, является востребованным при организации «умных производств» [1–2]. При этом важным условием адекватного функционирования подобных комплексов и систем является использование исключительно достоверной измерительной информации при принятии решений. По этой причине в их составе целесообразно применять интеллектуальные датчики и системы, обеспечивающие автоматический контроль качества процесса измерения, в частности, за счет реализации функции метрологического самоконтроля [3–4]. Таким образом, постоянное совершенствование методов и средств измерений, их метрологического обеспечения является важной задачей, особенно если это приводит к расширению круга допустимых измерительных ситуаций (появлению возможности решения новых актуальных измерительных задач) [5].

Как известно, температура является одним из главнейших параметров, характеризующих состояние любого физического тела, в том числе и промышленного оборудования [6]. Методы пирометрии (в том числе — тепловидение) занимают особое важное место в области температурных измерений. К их основным достоинствам следу-

ет отнести быстроту, высокую чувствительность, а также отсутствие непосредственного контакта с объектом контроля, что обеспечивает возможность измерения температуры труднодоступных, жидких, сыпучих и опасных объектов [7–8]. Однако ключевым недостатком пирометрии является достаточно сильная зависимость результатов измерений от внешних факторов: состояния поверхности объекта (характеризуемого спектральным коэффициентом излучения) и состояния среды распространения излучения от объекта до термометра (наличие пыли, дождя, тумана, а также поглощение излучения атмосферными газами) [9–11].

В теоретической плоскости эффект влияния поглощения теплового излучения парами воды, входящими в состав атмосферы, на результаты бесконтактного измерения температуры известен достаточно давно [7]. Тем не менее принято считать, что подобным влиянием можно пренебречь, особенно при проведении измерений на коротких дистанциях (до 3–5 м). Поэтому в научной литературе приводятся, как правило, только краткие ориентировочные сведения об уровне данной составляющей погрешности [6, 8]. Однако предварительно проведенные исследования показывают, что в условиях промышленности этот эффект может привести к заведомо недостоверным результатам, особенно если объект находится на расстоянии 10 м и более [12–13].

Таким образом, задача детального исследования погрешности бесконтактных измерений температуры, вызванной неустранимым влиянием поглощения теплового излучения атмосферными парами воды, является актуальной. Помимо всего прочего, это позволит выработать рекомендации по построению интеллектуальных пирометров (тепловизоров) устойчивых к данному дестабилизирующему фактору.

Описание проблемы. С теоретической точки зрения, процесс бесконтактного измерения температуры может быть описан так называемой радиометрической (пирометрической) цепочкой [7], которая представляет собой модель теплового взаимодействия между объектом наблюдения (источником теплового излучения) и измерительным средством (пирометром или тепловизором) с учетом влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Детальный теоретический анализ типовой радиометрической цепочки был проведен ранее [10–11]. Следует особо отметить, что даже в идеальных условиях зависимость между собственной температурой объекта и спектральной характеристикой его инфракрасного (теплового) излучения имеет достаточно сложный характер, подчиняясь закону Планка. Это предоставляет уникальную возможность параллельной регистрации излучения в нескольких спектральных интервалах с последующим вычислением значения температуры объекта по соотношению сигналов отдельных измерительных каналов (методы многоканальной или спектральной пирометрии) [8, 13]. Таким образом, теоретически возможно получить оценку температуры, инвариантную к ряду дестабилизирующих факторов, например — интегральному коэффициенту излучения объекта.

Как было показано выше, одним из потенциально неустранимых внешних дестабилизирующих факторов является поглощение инфракрасного излучения водяным паром, содержащимся в атмосфере. Основная сложность противодействия данному фактору связана с тем, что спектральная характеристика поглощения водяного пара имеет существенно нелинейную форму со множеством линий и полос поглощения разной ширины (рис. 1). При этом уровень поглощения (по аналогии с законом Бугера — Ламберта — Бера для растворов) зависит как от длины оптического пути между объектом и пирометром, так и от абсолютного содержания паров воды в атмосфере, что, в свою очередь, может быть определено через относительную влажность и температуру воздуха (среды) [7]. Кроме того, хорошо известно, что с ростом температуры воздуха его потенциальная влагоемкость увеличивается по экспоненциальному закону [14]. Все это свидетельствует о невозможности построения относительно простой модели учета влияния данного фактора, которая была бы адекватна реальным условиям в широких пределах [12].

В научной литературе, как правило, основной метод борьбы с влиянием поглощения водяного пара связывают с «оптимальным» выбором спектрального диапазона чувствительности приемника излучения вне основных полос поглощения паров воды [6–8]. Однако, как хорошо видно из анализа графика рис. 1, даже при проведении измерений на относительно небольших расстояниях, на соответствующей спектральной характеристике пропускания атмосферы нет достаточно широкого интервала, полностью свободного от полос поглощения

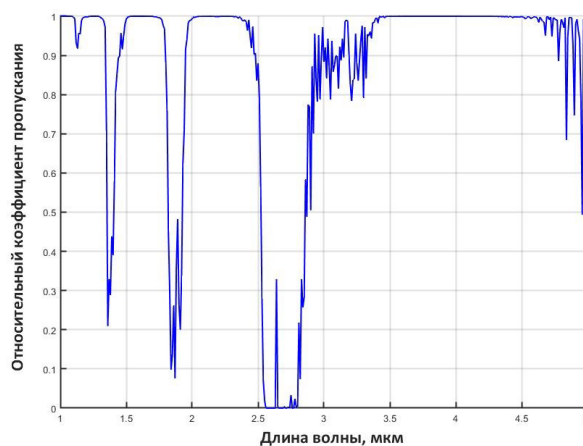


Рис. 1. Относительный коэффициент пропускания атмосферы (концентрация паров воды $11,5 \text{ г/м}^3$, дистанция измерения 15 м)

воды (поддиапазон 3,5...4,5 мкм также не может считаться в достаточной степени протяженным). Таким образом, применение в конструкции прибора относительно широкополосных чувствительных элементов будет автоматически приводить к возникновению дополнительной погрешности смещения. В случае же использования узкополосных приемников излучения основной проблемой становится ухудшение пороговой чувствительности, вызванное существенным уменьшением энергии сигнала по сравнению с шумами приемника излучения (отношение сигнал/шум), препятствующее качественному проведению измерений (росту неопределенности) для относительно низкотемпературных объектов [13].

Постановка задачи. Основная цель данной работы заключается в определении (путем детального моделирования) ориентировочных значений погрешности результатов бесконтактных температурных измерений, вызываемой влиянием поглощения инфракрасного излучения объекта атмосферными парами воды для диапазона температур объекта $100–600 \text{ }^\circ\text{C}$ в промышленных условиях. Предлагается рассмотреть 4 измерительные ситуации, каждая из которых характеризуется уникальной интенсивностью поглощения, постепенно увеличивающейся от ситуации к ситуации. Таким образом, предполагается подтвердить утверждение, высказанное в работе [12], о том, что даже на дистанциях 1–10 м нельзя игнорировать данную составляющую общей погрешности пирометрических измерений.

Достижение поставленной цели предполагает разработку модели радиометрической цепочки, качественно учитывающей эффекты молекулярного поглощения инфракрасного излучения водяным паром в различных участках спектра. Это достигается использованием базы данных HITRAN, содержащей в высокой степени адекватное описание молекулярных линий поглощения газов в ИК-диапазоне [15]. С целью выработки рекомендаций по оптимальному выбору датчиков для решения определенной измерительной задачи в работе исследуется возможность применения 11 вариантов приемников излучения, по своим параметрам соответствующих фотогальваническому элементу ФЭ-724 (производства АО «НИИ «Гириконд») [16–17] с дополнительно установленными оптическими фильтрами,

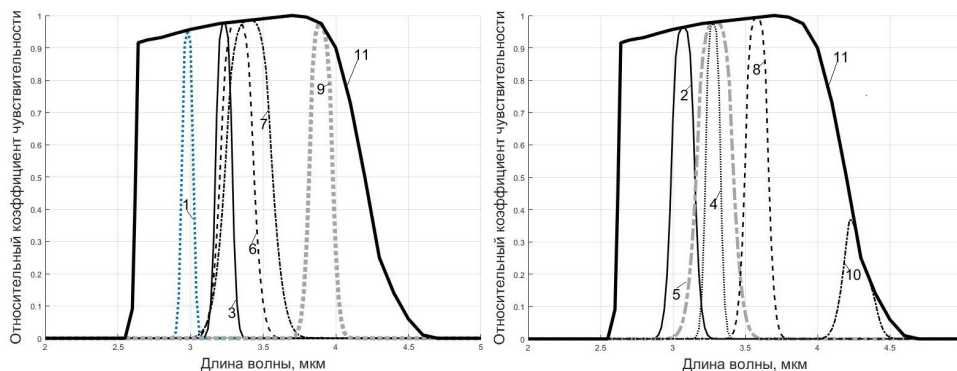


Рис. 2. Спектральные характеристики чувствительности рассматриваемых каналов регистрации излучения

формирующими 11 уникальных спектральных характеристик чувствительности.

Описание модели. Используемая в рамках данной работы, по аналогии с [18], математическая модель радиометрической цепочки базируется на следующем аналитическом выражении, позволяющем определить значение сигнала на выходе схемы обработки сигнала чувствительного элемента пирометра $s(T)$ при условии, что температура объекта равна T :

$$s(T) = K \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} G(\lambda, T) \cdot F(\lambda, d, T_A, \varphi) \cdot D(\lambda) d\lambda + n_s, \quad (1)$$

где K — обобщенный коэффициент преобразования схемы обработки сигнала; $G(\lambda, T)$ — спектральная поверхностная плотность потока излучения объекта («черного тела»), описываемая законом Планка [7] и моделируемая в пределах диапазона длин волн от $\lambda_{\min} = 1$ мкм до $\lambda_{\max} = 5$ мкм; $F(\lambda, T_A, \varphi)$ — спектральная характеристика пропускания атмосферы (d — расстояние между объектом и пирометром, T_A — температура воздуха; φ — относительная влажность); $D(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности приемника излучения; n_s — случайная величина (с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением σ_{n_s}), характеризующая собственный шум приемника излучения и системы обработки.

Как уже было упомянуто, для адекватного моделирования спектральной характеристики пропускания была использована база данных молекулярной спектроскопии HITRAN («line-by-line»), являющаяся на текущий момент всемирным стандартом для расчета и исследования эффектов пропускания атмосферными газами электромагнитного излучения в диапазоне от микроволновой до ультрафиолетовой области спектра [19]. Реализованная на ее основе в системе MATLAB модель позволяет с высокой степенью точности учесть фактор поглощения ИК-излучения объекта во всем рассматриваемом диапазоне длин волн с возможностью вариативного задания параметров радиометрической цепочки (d, T_A, φ). Четыре рассматриваемые в данном исследовании измерительные ситуации характерны для условий промышленности и различаются интенсивностью поглощения: 1) $d = 2$ м, $T_A = 20$ °С, $\varphi = 40$ % (концентрация паров воды $6,92$ г/м³); 2) $d = 5$ м, $T_A = 25$ °С, $\varphi = 50$ % (концентрация паров воды $11,5$ г/м³); 3) $d = 15$ м, $T_A = 30$ °С, $\varphi = 60$ % (концентрация паров воды $18,2$ г/м³); 4) $d = 25$ м, $T_A =$

$= 40$ °С, $\varphi = 75$ % (концентрация паров воды $38,4$ г/м³). График, изображенный на упомянутом ранее рис. 1, является иллюстрацией возможностей реализованной модели, так как был получен с ее использованием, при этом вычисленная характеристика в полной мере соответствует данным, представленным в научной литературе [6, 7, 14].

Для моделирования спектральной характеристики чувствительности приемника излучения ФЭ-724 (построенного на основе селенида свинца) были использованы экспериментальные данные, опубликованные производителем [17]. В том числе были аналитически описаны характеристики оптических фильтров, размещаемых перед датчиком и позволяющих получить 11 вариантов построения измерительных каналов со следующими областями чувствительности (по уровню 50 %): 1) 2,95...3,03 мкм; 2) 3,01...3,14 мкм; 3) 3,18...3,23 мкм; 4) 3,194...3,327 мкм; 5) 3,18...3,4 мкм; 6) 3,25...3,38 мкм; 7) 3,25...3,54 мкм; 8) 3,51...3,65 мкм; 9) 3,82...3,96; 10) 4,21...4,41; 11) 2,6...4,2 мкм. Последний из перечисленных приемник излучения (ПИ) следует считать широкополосным, остальные — узкополосными. На рис. 2 в сравнении изображены характеристики чувствительности всех рассматриваемых оптических каналов регистрации излучения.

В реальных условиях вычисление значения оценки измеряемой температуры пирометром происходит на основе предварительно определенных для конкретного прибора калибровочных характеристик, регистрируемых, как правило, в лабораторных условиях с использованием модели абсолютно черного тела (АЧТ). Аналогичным образом, для каждого из 11-ти вариантов измерительного канала была смоделирована своя уникальная калибровочная зависимость в диапазоне температур от 50 до 650 °С, при этом лабораторные условия характеризовались следующими параметрами радиометрической цепочки: $d = 0,5$ м; $T_A = 22,5$ °С; $\varphi = 50$ % (концентрация паров воды 10 г/м³).

Детальная экспериментальная проверка адекватности предложенной модели затруднена по причине сложности воспроизведения в лабораторных условиях большинства рассматриваемых измерительных ситуаций, но частично возможна в диапазоне температур 300–500 °С на небольших расстояниях. Для проведения измерений был использован пирометрический модуль в составе экспериментальной установки [20], содержащий приемник излучения с характеристиками, близкими к 11-му рассматриваемому каналу, а также АЧТ «Медея» производства ООО «НПЛ «Метропир», г. Санкт-Петербург.

Сравнение результатов моделирования измерительной ситуации с результатами эксперимента

МОДЕЛИРОВАНИЕ		ЭКСПЕРИМЕНТ	
Температура объекта, °С	Расчетные показания пирометра, °С	Температура АЧТ, °С	Показания пирометра, °С
480	474,84	480 ± 0,8	475,0 ± 0,15
450	445,45	450 ± 0,8	445,3 ± 0,18
400	396,38	400 ± 0,8	395,8 ± 0,25
350	347,2	350 ± 0,8	346,9 ± 0,3
300	297,9	300 ± 0,8	297,7 ± 0,45

Оптические характеристики пирометра и конструкция АЧТ позволяют обеспечить точную фокусировку для проведения измерений с расстояний до 5 метров. При проведении эксперимента параметры радиометрической цепочки были установлены (поддерживались) следующим образом: $d = 4,5$ м; $T_A = 27$ °С; $\varphi = 40$ %; $T = 300, 350, 400, 450, 480$ °С. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования измерительной ситуации с соответствующими параметрами приведены в табл. 1, сравнительный анализ которых позволяет сделать вывод о достаточной степени адекватности предложенной модели радиометрической цепочки. Кроме того, в результате проведенного эксперимента было оценено численное значение собственного шума σ_{ns} , необходимое для последующих расчетов случайной составляющей погрешности пирометрических измерений для всех 11-ти рассматриваемых каналов.

Результаты моделирования. Основная цель моделирования заключалась в определении значения систематической погрешности (смещения) измерений, проводимых с использованием одноканального пирометра, а также ориентировочной оценке случайной ее составляющей (стандартной неопределенности) для 11-ти рассмотренных спектральных каналов регистрации излучения в условиях четырех описанных выше измерительных ситуаций при изменении температуры объекта в диапазоне от 100 до 600 °С. В качестве аналитической модели радиометрической цепочки было использовано выражение (1). Исходя из общей цели исследования, влияние на результат измерения неидеальности излучательной способности поверхности объекта, а также эффекта рассеяния излучения атмосферными аэрозолями не учитывалось.

На рис. 3 приведены графики зависимости погрешности смещения от температуры объекта для 11-го (широкополосного) приемника излучения (область чувствительности: 2,6...4,2 мкм). Хорошо видно, что заметный рост данной составляющей погрешности наблюдается с увеличением T , а также с ухудшением условий измерения (при повышении концентрации водяного пара и/или увеличении расстояния от объекта до пирометра). При этом, если для первой измерительной ситуации ($d = 2$ м, $T_A = 20$ °С, $\varphi = 40$ %) значение погрешности остается в целом приемлемым (не превышает 6 °С), то в случае более сложных условий, а особенно — для четвертой измерительной ситуации ($d = 25$ м, $T_A = 40$ °С, $\varphi = 75$ %) — погрешность превышает критический уровень в 10 °С уже начиная с $T = 250$ °С, достигая в максимуме 52 °С (при $T = 600$ °С). Это подтверждает высказанное ранее

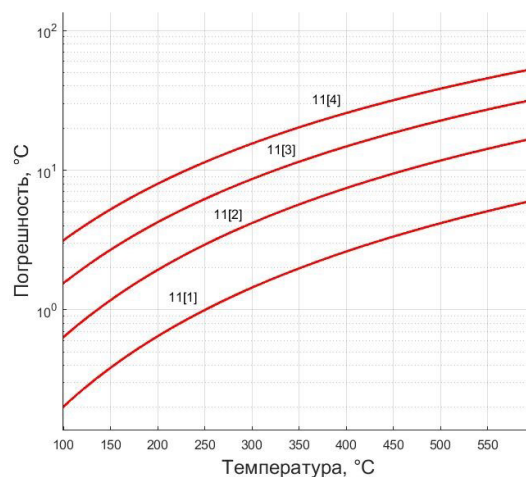


Рис. 3. Систематическая погрешность измерений (здесь и далее: число перед скобкой — номер спектральной характеристики приемника излучения, число в скобках — номер измерительной ситуации)

предположение о необходимости обязательного учета влияния эффекта поглощения излучения атмосферными газами при проведении бесконтактных температурных измерений с расстояний, больших, чем 5–10 м.

Аналогичные графики, отражающие поведение систематической составляющей погрешности для всех 11-ти рассматриваемых каналов регистрации излучения при условии четвертой измерительной ситуации, показаны на рис. 4. Обращает внимание, что у трех узкополосных приемников излучения: 8-го (3,51...3,65 мкм), 9-го (3,82...3,96 мкм) и 10-го (4,21...4,41 мкм) величина смещения остается незначительной даже при высоком уровне влажности атмосферы. Это обусловлено отсутствием в соответствующих спектральных интервалах более-менее интенсивных линий и полос поглощения паров воды. К наиболее неблагоприятным результатам приводит использование в канале регистрации излучения узкополосных приемников, спектральная характеристика чувствительности которых смещена в коротковолновую область: 1-го (2,95...3,03 мкм); 2-го (3,01...3,14 мкм); 3-го (3,18...3,23 мкм); 4-го (3,194...3,327 мкм). Относительно приемлемые результаты демонстрирует 11-й (широкополосный) приемник излучения и 7-й узкополосный (3,25...3,54 мкм).

Несколько иная картина наблюдается при рассмотрении погрешности смещения, проявляющейся

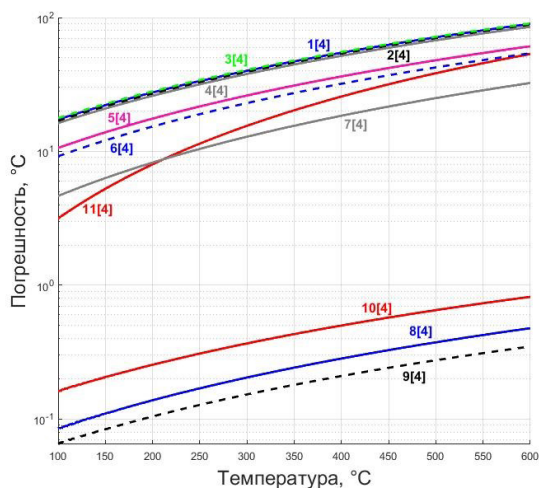


Рис. 4. Систематическая погрешность измерений в наихудших условиях (измерительная ситуация № 4)

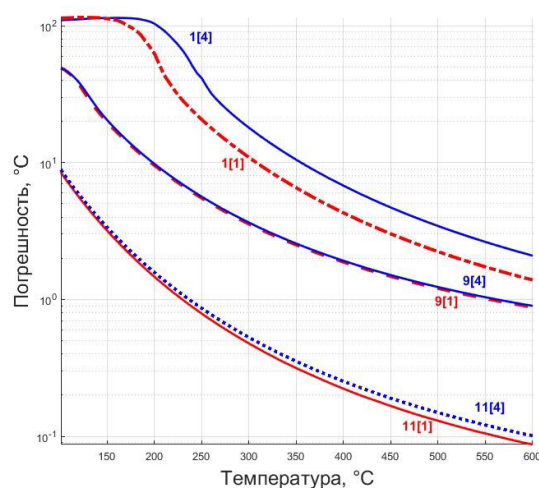


Рис. 6. Случайная погрешность измерений

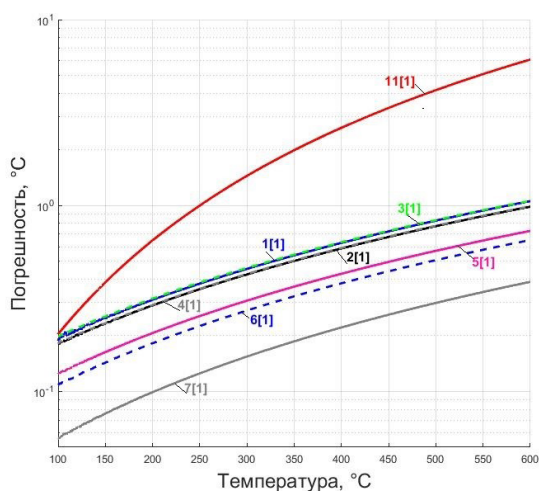


Рис. 5. Систематическая погрешность измерений в наилучших условиях (измерительная ситуация № 1)

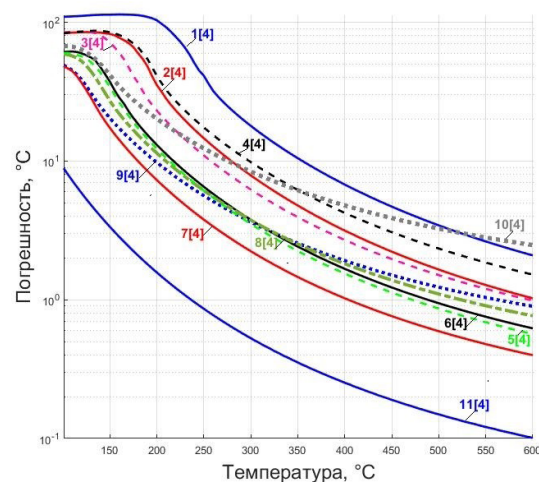


Рис. 7. Случайная погрешность измерений в наилучших условиях (измерительная ситуация № 4)

в условиях первой измерительной ситуации (рис. 5). На данном рисунке не приведены графики для 8-го, 9-го и 10-го каналов, так как расчетный уровень их погрешности минимален (не превышает $0,01$ °C). В указанном случае (при условии относительно умеренного поглощения излучения водяным паром) к наибольшей погрешности смещения приводит использование широкополосного (11-го) приемника в составе измерительного канала пирометра, тогда как применение узкополосных чувствительных элементов снижает данную составляющую погрешности до уровня 1 °C и ниже. Таким образом, ухудшение условий измерения (в плане увеличения степени поглощения излучения атмосферными парами воды) в наибольшей степени отражается на измерительных каналах, содержащих узкополосные приемники, спектральные характеристики чувствительности которых расположены в области $2,9...3,5$ мкм.

Анализ погрешности пирометрических измерений оказывается неполным без исследования ее случайной составляющей (стандартной неопределенности), результаты моделирования которой в сравнении показаны на рис. 6 и рис. 7. Как следует из теории, неопределенность бесконтактных температурных измерений (обусловленная в дан-

ном случае собственными шумами чувствительных элементов и системы обработки) заметно снижается с ростом температуры объекта вследствие повышения соотношения сигнал/шум. При этом стоит отметить, что для измерительных каналов с использованием 8-го, 9-го и 10-го узкополосных приемников излучения поведение неопределенности остается практически неизменным (не зависит от концентрации водяного пара), что вполне объяснимо.

Напротив — в случае применения 1-го, 2-го, 3-го и 4-го чувствительного элементов — ухудшение внешних условий приводит к заметному росту случайной составляющей погрешности («пологие» участки графиков в области температур $100–200$ °C обусловлены близостью нижней границы диапазона калибровки пирометра, равной 50 °C). Для широкополосного канала регистрации излучения подобное увеличение уровня неопределенности незначительно.

Выводы по результатам моделирования. Поскольку поведение случайной и систематической составляющих погрешности измерения имеет достаточно сложный и существенно различный характер, то целесообразно по отдельности рассмотреть результаты моделирования для трех поддиапазонов

измеряемых температур объекта: 100–200 °С, 200–400 °С, 400–600 °С.

Для бесконтактных измерений температуры в нижнем поддиапазоне (100–200 °С), прежде всего, следует отметить недопустимо высокий уровень случайной составляющей погрешности при использовании узкополосных приемников излучения. Таким образом, их применение в данном случае нецелесообразно даже для проведения измерений в условиях, приближенных к лабораторным. С другой стороны, даже в самой сложной из рассматриваемых измерительных ситуаций погрешность смещения для широкополосного измерительного канала не превышала 5–8 °С, что свидетельствует о его оптимальности для данного поддиапазона измеряемых температур.

Верхний поддиапазон (400–600 °С), напротив, характеризуется низким уровнем случайной составляющей погрешности для всех рассмотренных датчиков. В этом случае, наиболее целесообразным выглядит использование узкополосных приемников излучения № 8 и № 9, спектральная характеристика чувствительности которых лежит в области, свободной от полос поглощения воды. Их общая погрешность не превышает 2,5 °С даже в самой сложной измерительной ситуации. Тогда как применение широкополосного измерительного канала может привести к заведомо недостоверным результатам при уровне относительной влажности воздуха выше 50% и дистанции измерений более 5–10 м.

Особое внимание привлекают полученные результаты для диапазона измеряемых температур 200–400 °С, для которого однозначно оптимального решения по построению одноканального пирометра найти не удается. Недостатком использования узкополосных приемников № 8 и № 9 является достаточно высокий уровень случайной погрешности (до 10–12 °С), а применение широкополосных чувствительных элементов приводит к значительному росту погрешности смещения в сложных условиях (до 20–25 °С). Потенциально компромиссный вариант (датчик № 7) также не является удачным решением по причине сильной зависимости показаний от условий измерения. Таким образом, более-менее качественные результаты в этом поддиапазоне можно получить только при проведении измерений в условиях, приближенных к лабораторным, или при использовании специализированных алгоритмов усреднения, что значительно ограничивает круг решаемых практических задач. Очевидно, что в данном случае следует подробно рассмотреть возможность построения измерительных приборов с несколькими параллельными каналами регистрации излучения.

При использовании узкополосных приемников излучения, помимо рассмотренного выше влияния паров воды, в обязательном порядке нужно учитывать полосы поглощения других атмосферных газов, концентрация которых, особенно в промышленных условиях, может быть весьма заметной. Прежде всего это касается оксидов углерода СО и СО₂, озона, углеводородов и т.д.

Заключение. Как показало проведенное исследование, пренебрежение эффектом поглощения излучения объекта атмосферными парами воды при проведении бесконтактных температурных измерений может привести к заметному отклонению их результатов от истинных значений даже на относительно небольших дистанциях (5–10 метров). Реализованные в современных приборах

(тепловизорах и пирометрах) модели компенсации влияния данного фактора не являются качественным решением проблемы (особенно в сложных нестационарных промышленных условиях), так как их адекватное использование постоянно требует от оператора точных и достоверных данных о текущем состоянии параметров атмосферы. Построение одноканальных пирометров на базе узкополосных датчиков, область чувствительности которых лежит в диапазоне, свободном от полос поглощения паров воды, также не может быть признано удачным решением из-за ухудшения соотношения сигнал/шум, а также потенциального влияния на их показания других газов, содержащихся в атмосфере. В этой связи перспективным, на наш взгляд, является развитие концепции автоматического контроля условий измерения за счет создания информационной избыточности путем формирования в пирометрах дополнительных каналов регистрации излучения.

Библиографический список

1. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // *Journal of Industrial Information Integration*. 2017. Vol. 6. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
2. Huang Z., Shen Y., Li J., Fey M., Brecher C. AI-Driven Digital Twins. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 6340. P. 1–35. DOI: 10.3390/s21196340.
3. Taymanov R., Pronin A., Sapozhnikova K. [et al.]. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1379, no. 012049. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012049.
4. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R. Increasing Measurement Trustworthiness as a Necessary Part of Technology Development // *Sensors & Transducers*. 2021. Vol. 251, Issue 4. P. 61–69.
5. Taymanov R., Sapozhnikova K., Prokopchina S. What is immeasurable make measurable with artificial intelligence (measurements & artificial intelligence) // *Measurement: Sensors*. 2021. Vol. 18, no. 100316. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100316.
6. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва: ИД Спектр, 2009. 544 с. ISBN 978-5-904270-05-6.
7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. Москва: Мир, 1988. 416 с. ISBN 5-03-000915-9.
8. Zang Z. M., Tsai B. K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals. Vol. 42. *Experimental Methods in the Physical Sciences*. Publisher: Academic Press, 2009. 376 p.
9. Chernysheva N. S., Ionov A. B., Ionov B. P. The Main Principles of Development of an Intelligent Multi-Channel Radiation Thermometer // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29–July 03, 2020. Chermal, Russia, 2020. P. 226–233. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153495.
10. Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Ионов А. Б. Диагностика измерительной ситуации при бесконтактных измерениях температуры в сложных условиях // *Омский научный вестник*. 2016. № 6 (150). С. 147–151.
11. Ionov A. B. Metrological Problems of Pyrometry: an Analysis and the Prospects for Solving Them // *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56, no. 6. P. 658–663.
12. Minkina W., Klecha D. Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements // *J. Sens. Sens. Syst*. 2016. Vol. 5. P. 17–23. DOI: 10.5194/jsss-5-17-2016.
13. Ионов А. Б. Синтез малоканалных систем пирометрического мониторинга объектов с температурой 200..800 °С // *Мир измерений*. 2012. № 10 (140). С. 42–47.

14. Тимофеев Ю. М., Васильева А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. Санкт-Петербург: Наука, 2003. 474 с. ISBN 5-02-024976-9.
15. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. [et al.] The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. Vol. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
16. Пат. 2261502 Российская Федерация, МПК Н 01 L 33/00, 31/101, 31/12. Фотолюминесцентный излучатель, полупроводниковый фотоэлемент и оптрон на их основе / Горбунов Н. И., Варфоломеев С. П., Дийков Л. К., Марахонов В. М., Медведев Ф. К. № 2004104374/28, заявл. 05.02.04; опубл. 27.09.05, Бюл. № 27.
17. Анисимова Н. П., Кулагов В. Б., Луганский Ю. М. Промышленные низкотемпературные пирометры спектрального отношения // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 83–86.
18. Minkina W., Dudzik S. Infrared Thermography. Errors and Uncertainties. New York: John Wiley & Sons, 2009. 212 p. ISBN 978-0-470-74718-6.
19. Фомин Б. А., Колокутин Г. Э. Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектроскопии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 17–24.
20. Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Ионов А. Б. Экспериментальная установка для изучения влияния запыленности на бесконтактные измерения температуры // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 110–115. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-110-115.

ИОНОВ Антон Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5647-6944
AuthorID (РИНЦ): 518556
ORCID: 0000-0002-4538-6627
AuthorID (SCOPUS): 55899469100
Адрес для переписки: antionov@mail.ru
ЧЕРНЫШЕВА Надежда Сергеевна, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 7451-4970
AuthorID (РИНЦ): 909195
ORCID: 0000-0002-6160-7864
Author ID (SCOPUS): 56211164700
Адрес для переписки: wia_lady@mail.ru
ИОНОВ Борис Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 8118-3805
AuthorID (РИНЦ): 685217
AuthorID (SCOPUS): 6603024036
Адрес для переписки: bion_rtu@mail.ru
РЯБОВА Мария Анатольевна, магистрант гр. ПРМ-211 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.
Адрес для переписки: mariaa_ryabova@mail.ru

Для цитирования

Ионов А. Б., Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Рябова М. А. Оценка влияния атмосферного водяного пара на результаты бесконтактного измерения температуры // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 131–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-131-139.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023 г.
© А. Б. Ионов, Н. С. Чернышева, Б. П. Ионов,
М. А. Рябова

SIMULATION OF THE EFFECT OF ABSORPTION BY ATMOSPHERIC WATER VAPOR ON THE RESULTS OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENTS

The article investigates the effect of atmospheric water vapor on the results of non-contact temperature measurements carried out in the range from 100 to 600 °C. It is known that the key disadvantage of radiation thermometry is a rather strong dependence of the measurement results on external factors: the state of the surface of the object, as well as the state of the environment for the propagation of radiation from the object to the thermometer. Water vapor constantly present in the atmosphere selectively absorbs the infrared radiation of the object, which leads to underestimation of the results. This effect depends on the humidity and temperature of the air, as well as on the distance between the object and the radiation thermometer. On the basis of the simulation performed using the MATLAB system and the HITRAN molecular spectroscopy database, the values of random and systematic errors are calculated for four measurement situations typical of industrial conditions that differ in the level of absorption by water vapor. Eleven variants of radiation receivers with unique spectral sensitivity characteristics are studied. It is shown that the effect of absorption of the infrared radiation of an object by water vapor can lead to a significant decrease in the reliability of measurements carried out even at short distances.

Keywords: non-contact temperature measurements, radiation thermometer, thermographic camera, water vapor, relative humidity, molecular absorption, HITRAN database.

References

1. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. Vol. 6. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005. (In Engl.).
2. Huang Z., Shen Y., Li J., Fey M., Brecher C. AI-Driven Digital Twins. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 6340. P. 1–35. DOI: 10.3390/s21196340. (In Engl.).
3. Taymanov R., Pronin A., Sapozhnikova K. [et al.]. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1379, no. 012049. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012049. (In Engl.).
4. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R. Increasing Measurement Trustworthiness as a Necessary Part of Technology Development // Sensors & Transducers. 2021. Vol. 251, Issue 4. P. 61–69. (In Engl.).
5. Taymanov R., Sapozhnikova K., Prokopchina S. What is immeasurable make measurable with artificial intelligence (measurements & artificial intelligence) // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18, no. 100316. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100316. (In Engl.).

6. Vavilov V. P. Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol' [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, 2009. 544 p. ISBN 978-5-904270-05-6. (In Russ.).
7. Gossorg Zh. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primeneniye: per. s frants [Infrared thermography. Fundamentals, technique, application: trans. from French]. Moscow, 1988. 416 p. ISBN 5-03-000915-9. (In Russ.).
8. Zang Z. M., Tsai B. K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals. Vol. 42. Experimental Methods in the Physical Sciences. Publisher: Academic Press, 2009. 376 p. (In Engl.).
9. Chernysheva N. S., Ionov A. B., Ionov B. P. The Main Principles of Development of an Intelligent Multi-Channel Radiation Thermometer // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29–July 03, 2020. Chermal, Russia, 2020. P. 226–233. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153495. (In Engl.).
10. Chernysheva N. S., Ionov B. P., Ionov A. B. Diagnostika izmeritel'noy situatsii pri beskontaktnykh izmereniyakh temperatury v slozhnykh usloviyakh [Diagnosis of the difficult measuring situation of non-contact temperature measurements] // Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin. 2016. № 6 (150). P. 147–151. (In Russ.).

11. Ionov A. B. Metrological Problems of Pyrometry: an Analysis and the Prospects for Solving Them // *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56, no. 6. P. 658–663. (In Engl.).
12. Minkina W., Klecha D. Atmospheric transmission coefficient modeling in the infrared for thermovision measurements // *J. Sens. Sens. Syst.* 2016. Vol. 5. P. 17–23. DOI: 10.5194/jsss-5-17-2016. (In Engl.).
13. Ionov A. B. Sintez malokanal'nykh sistem pirometricheskogo monitoringa ob'yektov s temperaturoy 200...800°S [Synthesizing low-channel systems for pyrometrical monitoring of items at a temperature of 200 to 800°C] // *Mir izmereniy. Measurements World*. 2012. No. 10 (140). P. 42–47. (In Russ.).
14. Timofeyev Yu. M., Vasil'yeva A. V. Teoreticheskiye osnovy atmosferynoy optiki [Theoretical Foundations of Atmospheric Optics]. Saint Petersburg, 2003. 474 p. ISBN 5-02-024976-9. (In Russ.).
15. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. [et al.] The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2016. Vol. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038. (In Engl.).
16. Patent 2261502 Russian Federation, IPC H 01 L 33/00, 31/101, 31/12. Fotolyuminescentnyy izluchatel', poluprovodnikovyy fotoelement i optron na ikh osnove [Photoluminescent emitter, semiconductor element and optron based on Said devices] / Gorbunov N. I., Varfolomeev S. P., Dijkov L. K., Marakhonov V. M., Medvedev F. K. No. 2004104374/28. (In Russ.).
17. Anisimova N. P., Kulagov V. B., Luganskiy Yu. M. Promyshlennyye nizkotemperaturnyye pirometry spektral'nogo otnosheniya [Industrial especially low-temperature color pyrometers] // *Prikladnaya fizika. Applied Physics*. 2015. No. 6. P. 83–86. (In Russ.).
18. Minkina W., Dudzik S. *Infrared Thermography. Errors and Uncertainties*. New York: John Wiley & Sons, 2009. 212 p. ISBN 978-0-470-74718-6. (In Engl.).
19. Fomin B. A., Kolokutin G. E. Novaya spektroskopicheskaya baza HITRAN-2016 v polineynykh modelyakh, primenyayemykh v distantsionnom zondirovaniy Zemli metodami infrakrasnoy spektrometrii [New HITRAN-2016 spectroscopic database for line-by-line models used in remote sensing of the earth by infrared spectrometry] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019. Vol. 16, no. 1. P. 17–24. (In Russ.).
20. Chernysheva N. S., Ionov B. P., Ionov A. B. Eksperimental'naya ustanovka dlya izucheniya vliyaniya zapylennosti na beskontaktnyye izmereniya temperatury [Experimental setup for studying the effect of dustiness in case of non-contact temperature measurements] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 2 (158). P. 110–115. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-110-115. (In Russ.).

IONOV Anton Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5647-6944

AuthorID (RSCI): 518556

ORCID: 0000-0002-4538-6627

AuthorID (SCOPUS): 55899469100

Correspondence address: antionov@mail.ru

CHERNYSHEVA Nadezhda Sergeevna, Graduate Student of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7451-4970

AuthorID (RSCI): 909195

ORCID: 0000-0002-6160-7864

Author ID (SCOPUS): 56211164700

Correspondence address: wia_lady@mail.ru

IONOV Boris Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 8118-3805

AuthorID (RSCI): 685217.

AuthorID (SCOPUS): 6603024036

Correspondence address: bion_rtu@mail.ru

RYABOVA Mariya Anatolyevna, Undergraduate gr. PRm-211 of Elite Education and Magistracy Faculty, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: mariaa_ryabova@mail.ru

For citations

Ionov A. B., Chernysheva N. S., Ionov B. P., Ryabova M. A. Simulation of the effect of absorption by atmospheric water vapor on the results of non-contact temperature measurements // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 131–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-131-139.

Received May 26, 2023.

© A. B. Ionov, N. S. Chernysheva, B. P. Ionov, M. A. Ryabova

¹Филиал ПАО «Федеральная сетевая компания — Россети» — Ямало-Ненецкое предприятие магистральных электрических сетей, г. Ноябрьск

²Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, г. Ханты-Мансийск

³Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Известно, что для сдерживания процесса окисления трансформаторного масла, а соответственно, продления его ресурса, в него добавляется антиокислительная присадка ионол. Ранее специалистами с использованием метода хромато-масс-спектрометрии был установлен факт образования новых фенольных соединений в масле наряду с расходом ингибирующей присадки ионол, а именно 2,6-ди-*трет*-бутилфенол (2,6-ДТБФ) и 2,6-ди-*трет*-р-бензохинон. Данные фенольные соединения, так же как и ионол, относятся к классу пространственно-затрудненных фенолов, которые, в свою очередь, способны ингибировать процессы окисления масла в процессе его эксплуатации в маслонаполненном трансформаторном оборудовании, в частности в силовых трансформаторах и трансформаторах тока. В настоящей статье представлены результаты, показывающие, что по мере расходования ионола в масле из трансформаторов накапливается 2,6-ди-*трет*-бутилфенол. В наибольшей степени такая тенденция заметна для трансформаторов тока, оборудованных воздухоосушительными фильтрами (так называемое «свободное дыхание»). Образование 2,6-ДТБФ в масле может служить индикатором ускоренного старения масла в результате его длительного контакта с кислородом воздуха. Контроль изменения концентраций присадок в процессе старения масла осуществлялся с помощью разработанной нами новой методики, базирующейся на ИК-спектроскопии.

Ключевые слова: высоковольтный трансформатор, трансформаторное масло, антиокислительная присадка, фенольные соединения, ИК-спектроскопия, маркеры старения.

Основное назначение трансформаторного масла в высоковольтном оборудовании с бумажно-масляной изоляцией — обеспечение изоляции, эффективное охлаждение токоведущих частей высоковольтного оборудования, а также защита целлюлозы от переувлажнения. Для безупречного выполнения своих функций трансформаторное масло должно обладать хорошими электроизоляционными свойствами, а следовательно, высокой электрической прочностью, хорошей теплопроводностью, способностью сохранять свои основные свойства на протяжении продолжительного периода эксплуатации

при повышенных температурах и высоких электрических напряжениях [1]. С целью стабилизации и замедления процесса окисления трансформаторного масла в него, как правило, вводится антиокислительная присадка ионол.

Массовая концентрация ионола в свежих, неиспользованных маслах строго нормируется и составляет 0,2–0,4 %. В эксплуатационном трансформаторном масле — не менее 0,1 % масс [2]. Согласно работам Липштейна [3, 4], снижение концентрации ионола в рабочем трансформаторном масле до 0,1 % масс. и особенно до 0,05 % масс. недопустимо. Свя-

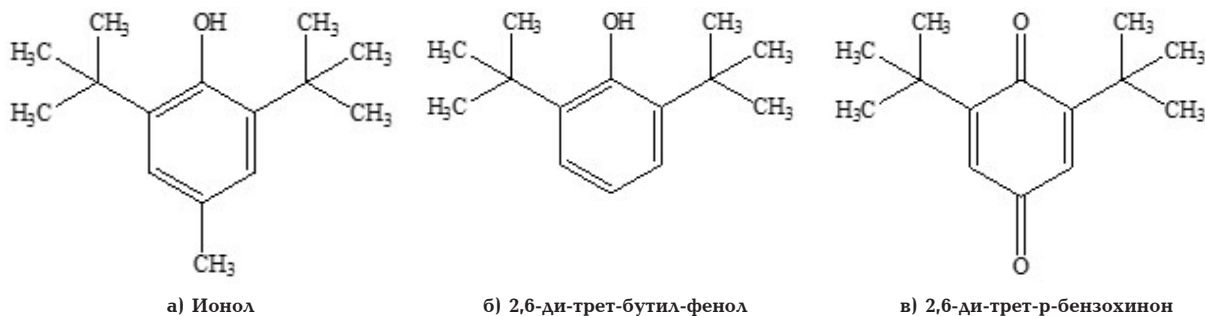


Рис. 1. Структурные формулы фенольных соединений, обнаруженных в эксплуатационном масле из высоковольтных трансформаторов

зано это с тем, что при достижении указанного уровня концентрации присадка проявляет проокислительные свойства, то есть не тормозит процесс окисления, а лавинообразно ускоряет его. Последнее означает, что процесс радикально-цепного окисления углеводородов масла протекает с огромной неконтролируемой скоростью. Однако многолетние регламентные испытания проб масла из действующего высоковольтного маслonaполненного оборудования (более 100 ед.) показали, что, несмотря на низкие концентрации ионола (менее 0,05 % масс.) в пробах масла, его электроизоляционные характеристики остаются на приемлемом эксплуатационном уровне [5]. В частности, значения таких показателей, как пробивное напряжение, тангенс угла диэлектрических потерь, кислотное число не выходят за предельные значения. Более того, коэффициент вариации значений указанных показателей не превышает 30 % за 12-летний период эксплуатации [5]. Последнее означает некоторую электрофизическую стабильность значений физико-химических показателей.

Ионол относится к соединениям фенольного типа, имеющего пространственно-затрудненное строение, его гидроксильная группа OH экранирована с двух сторон третбутильными радикалами (рис. 1а) [6]. Именно благодаря своему строению данное соединение проявляет сильные ингибирующие свойства по отношению к активным углеводородным радикалам, образующимся при окислении трансформаторного масла. К таким же соединениям относятся 2,6-ди-трет-бутилфенол (далее — 2,6-ДТБФ) (рис. 1б) и 2,6-ди-трет-р-бензохинон (рис. 1в), которые ранее были идентифицированы в эксплуатационном масле разных марок (ГК, ВГ, ТКц, Т-750, Nytro 11GX) [7–9]. При этом установлено, что по мере расходования ионола в масле в наибольшем количестве накапливается 2,6-ДТБФ, а 2,6-ди-трет-р-бензохинон обнаружен в следовых количествах. Вполне вероятно, что данные соединения в совокупности с ионолом проявляют синергический эффект, обеспечивая продление ресурса трансформаторного масла.

В настоящей работе преследовалось несколько главных целей: 1) установление корреляционной зависимости между физико-химическими показателями при старении масла; 2) определение предельного уровня содержания ионола в присутствии 2,6-ДТБФ, ниже которого действительно будет наблюдаться существенное ухудшение других параметров трансформаторного масла. Определение массовой концентрации антиокислительной присадки ионол и 2,6-ди-трет-бутилфенол при их совместном присутствии в трансформаторном масле осу-

ществлялось с помощью разработанной нами новой методики, базирующейся на ИК-спектроскопии, которая впервые представлена в настоящей статье. Разработка новой методики и ее применение в настоящем эксперименте обусловлено несколькими факторами. Во-первых, несмотря на обилие методик анализа традиционной присадки, ни одна из них не позволяет определять другие фенольные соединения совместно с ионолом [10]. Во-вторых, следует отметить ряд преимуществ предлагаемой методики перед другими: экспрессность; простота; небольшой объем пробы (1 мл); безопасность для персонала и окружающей среды, так как не требует применения химических реактивов и их утилизации; небольшое количество расходных материалов и в целом невысокая себестоимость анализа.

Основная часть. В качестве объектов исследования использовались образцы эксплуатационного масла со сроком эксплуатации более 20 лет, парафинового масла марки ВГ без антиокислительной присадки ионол (базовое масло), порошкообразные антиокислительная присадка ионол (или 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол) и 2,6-ДТБФ (или 2,6-ди-трет-бутилфенол), а также растворы ионола и 2,6-ДТБФ в трансформаторном масле.

Оборудование и условия проведения измерений: ИК-Фурье-спектрометр ФТ-801, (ООО НПФ «СИ-МЕКС» г. Новосибирск), оснащенный приставкой для экспресс-анализа жидкостей с позиционной жидкостной микрокюветой из ZnSe (диаметр окон 10 мм, толщина окон — 2 мм) с изменяющейся в зависимости от номера позиции оправы толщиной слоя, имеющей четыре положения: 1 номер соответствует 0,015 мм, 2—0,125 мм, 3—0,285 мм, 4—0,555 мм соответственно [11]. Инфракрасные спектры получены в режиме пропускания, в диапазоне сканирования среднем инфракрасном от 500 до 4000 см⁻¹. Спектры регистрировались со спектральным разрешением 4 см⁻¹ и количеством сканов 16. Полученные ИК-спектры обрабатывались в программном обеспечении ZaiR 3.5. Для регистрации одного ИК-спектра исследуемой жидкости необходимо не более 1 мл образца.

Градуировочные растворы фенолсодержащих ингибиторов готовили весовым методом, растворяя навеску ионола и 2,6-ди-трет-бутилфенола в базовом масле в полипропиленовых пробирках с последующим тщательным перемешиванием на встряхивателе для пробирок в течение 10 минут.

Для выполнения измерений несколько капель хорошо перемешанного образца базового масла (объемом около 50 мкл) помещали в центр подложки блока держателей. При этом следили за тем, чтобы между подложками кюветы не было пузырьков воз-

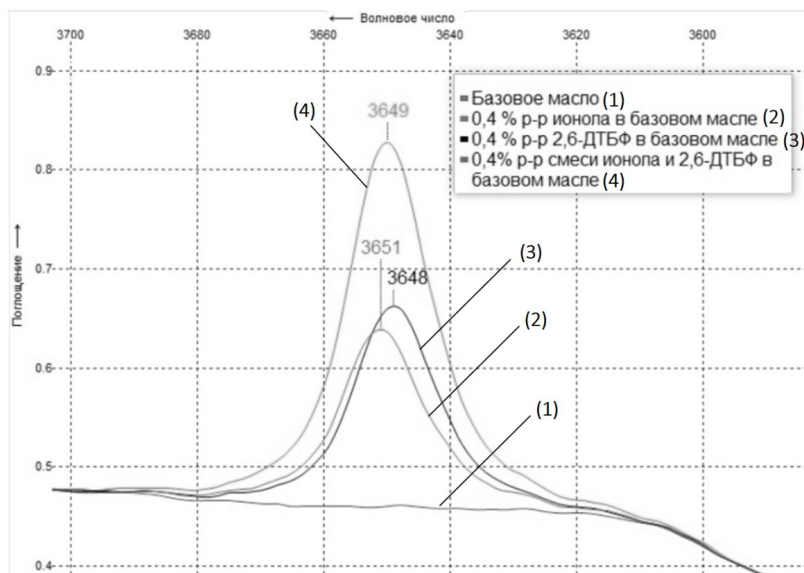


Рис. 2. ИК-спектры поглощения базового масла, 0,4% раствора ионола, 2,6-ДТБФ и их смеси в базовом масле, полученные в режиме пропускания на позиционной жидкостной кювете из ZnSe с толщиной слоя 0,555 мм в области 3700–3600 см^{-1}

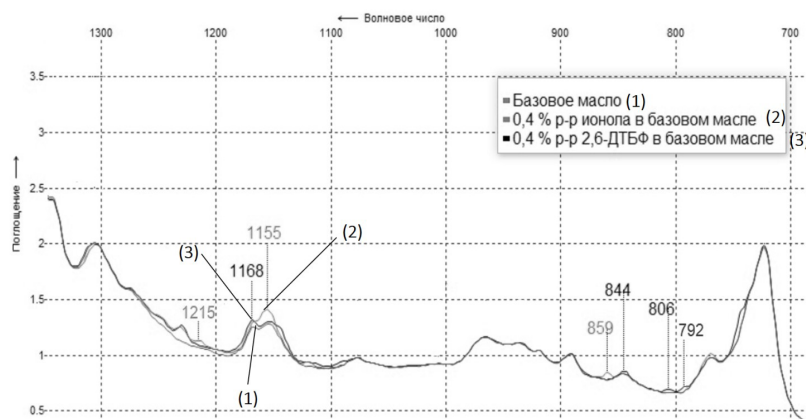


Рис. 3. ИК-спектры поглощения базового масла, 0,4% раствора ионола и 2,6-ДТБФ в базовом масле, полученные в режиме пропускания на позиционной жидкостной кювете из ZnSe с толщиной слоя 0,555 мм в области 1300–700 см^{-1}

духа. Устанавливали толщину слоя так, чтобы она соответствовала четвертому положению позиции оправы (0,555 мм). После чего записывали спектр образца в заданных условиях (условия записи опорного спектра и спектра образца должны быть идентичными).

На рис. 2 представлены ИК-спектры поглощения базового масла без каких-либо присадок, масла с содержанием ионола 0,4 % масс., масла с содержанием 2,6-ДТБФ 0,4 % масс., а также базового масла, ингибированного сразу двумя присадками (ионол и 2-ДТБФ).

На ИК-спектрах поглощения базового масла и растворов антиокислительных присадок в базовом масле, зарегистрированных в режиме пропускания на максимально возможной толщине слоя 0,555 мм, наблюдается интенсивная полоса поглощения в области 3700–3600 см^{-1} , соответствующая валентным колебаниям связи О-Н в молекулах ингибиторов (рис. 1). Следует отметить, что положение максимума этой полосы поглощения у исследуемых ингибиторов окисления различается всего на 3 см^{-1} :

для ионола максимум наблюдается на частоте 3651 см^{-1} , для 2,6-ДТБФ — незначительно смещен в сторону низкочастотной области спектра 3648 см^{-1} . В растворе смеси антиоксидантов максимум находится в промежуточном положении, и это обстоятельство не позволяет надежно дифференцировать эти присадки, что ранее было отмечено в [12]. Однако при сравнении двух антиокислительных присадок фенольного типа путем наложения спектров друг на друга, достаточно хорошо заметны отличия в области 700–1300 см^{-1} (рис. 3).

В частности, спектры антиокислительных присадок отличаются по оптическому отношению полос поглощения в области колебаний связи С-О фенольного фрагмента. Так, максимум полосы поглощения в области 1168 см^{-1} характерен для 2,6-ди-*трет*-бутилфенола, а в области 1155 см^{-1} — для ионола.

На рис. 4 представлены результаты регистрации ИК-спектров поглощения градуировочных растворов антиокислительных присадок в базовом масле различных концентраций, измерены оптические плотности в области 3651 см^{-1} и построены графики-

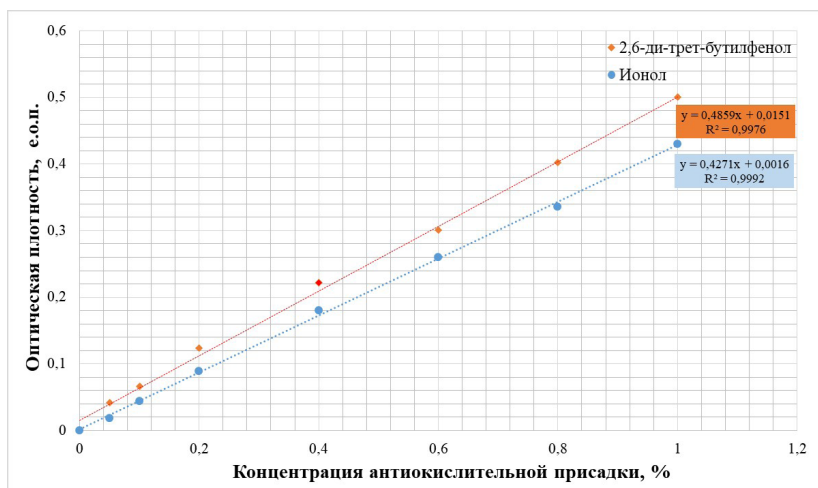


Рис. 4. Графическая зависимость оптической плотности максимума полосы поглощения фенольного фрагмента в молекулах антиокислительных присадок от их концентрации

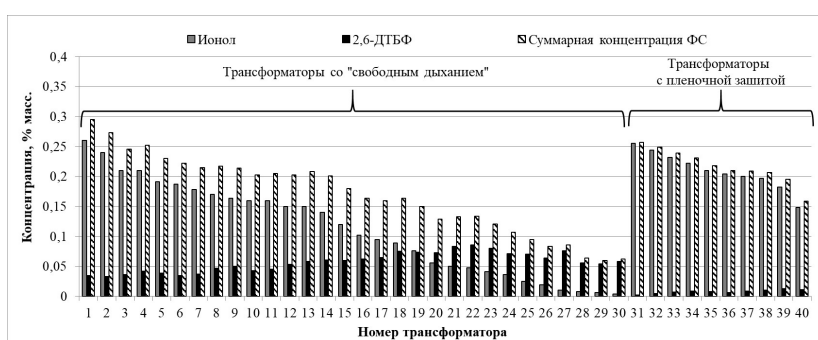


Рис. 5. Содержание фенольных соединений (ФС) в масле из высоковольтных трансформаторов

ческие зависимости положения максимума полосы поглощения от концентрации присадок.

Оптическая плотность максимума полосы поглощения фенольного фрагмента увеличивается с увеличением содержания ингибитора в градуировочных растворах. По сравнению с инолом, у 2,6-ди-трет-бутилфенола наблюдается более интенсивный сигнал, поэтому перед выполнением количественного определения содержание ингибитора в трансформаторном масле необходимо дифференцировать присадку для исключения вклада систематической ошибки, который может достигать 15–20 %.

Правильность результатов анализа оценивали с помощью искусственных смесей инола в базовом масле в диапазоне концентраций от 0,05 до 0,8 %. Для оценки метрологических характеристик каждый из 16 образцов проанализировали дважды в условиях повторяемости и внутривлабораторной прецизионности по двум параллельным определениям [13]. Применение приставки для экспресс-анализа жидкостей позволяет выполнять 15–20 единичных измерений в час. Статистическая обработка результатов показала, что дисперсии, рассчитанные для каждой пробы по критерию Кохрена и выборка по критерию Граббса однородны. Оценка повторяемости составила 0,9 %, воспроизводимости — 2,4 % при числе степеней свободы $f=15$. Показатель точности (границы относительной погрешности при вероятности $P=0,95$) составил 7,2 %. Результаты подтверждены методом «введено — найдено».

На рис. 5 приведены концентрации инола и 2,6-ДТБФ в пробах масла из высоковольтных трансформаторов напряжением 220 кВ (для примера показаны 40 проб из 320 проанализированных), измеренные по описанной выше методике. Из представленных данных видно, что концентрация 2,6-ДТБФ в масле из трансформаторов тока (ТТ, тип ТФЗМ) варьируется в пределах от 0,033 до 0,086 % по массе. В масле из силовых трансформаторов (СТ), имеющие пленочную защиту от окисления масла, массовое содержание 2,6-ДТБФ составляет 0,002–0,013 % масс. Трансформаторы тока типа ТФЗМ, в отличие от силовых трансформаторов, оборудованы воздухоосушительными фильтрами, заполненные силикагелем. Атмосферный воздух, проникающий в трансформатор при изменении объемов масла из-за температурных колебаний, проходит через слой силикагеля очищается от механических примесей и осушается от влаги. Согласно полученным результатам, очевидно, что 2,6-ДТБФ в наибольшем количестве образуется в масле из трансформаторов тока, оборудованных воздухоосушительными фильтрами (ВОФ), то есть ТТ, имеющие так называемое «свободное дыхание». Вероятно, скорость разложения и, соответственно, скорость образования 2,6-ди-трет-бутилфенола в масле в случае постоянного его соприкосновения с кислородом воздуха несколько выше по сравнению с силовыми трансформаторами, оборудованными герметичной защитой масла от окисления (пленочная защита). Следует также заметить, что 2,6-ДТБФ проявляет

заметную устойчивость, так как его содержание по мере выработки ионола возрастает (рис. 5).

Массовое содержание ионола во многих пробах масла находится ниже предельно допустимого значения (0,1 % масс.), и, вопреки выводам исследования [3], качество масла остается в удовлетворительном состоянии [5]. Как правило, по мере расходования присадки ионола значения показателей — тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С (ТАН), кислотное число (КЧ), оптическая мутность (ОМ) увеличиваются, что отрицательно сказывается на электроизоляционных свойствах масла [3]. Проведём корреляционно-регрессионный анализ и оценку характера связи физико-химических параметров на основе значений коэффициента корреляции Пирсона по уравнению 1.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_i — значения переменной X ; y_i — значения переменной Y ; \bar{x} — среднее арифметическое переменной X ; \bar{y} — среднее арифметическое переменной Y .

В табл. 1 приведены значения коэффициента корреляции, рассчитанные по формуле 1 на основе массива данных, полученных в процессе многолетних регламентных испытаний проб масла из действующих высоковольтных трансформаторов.

Отрицательное значение коэффициента корреляции указывает, что по мере расходования присадки ионола значение КЧ, ТАН, ОМ изоляционного масла увеличивается. Отрицательное значение коэффициента корреляции для зависимости «ионол — 2,6-ДТБФ» свидетельствует о том, что в процессе расходования антиокислительной присадки ионол в масле образуется фенольное соединение — 2,6-ди-*трет*-бутилфенол.

Согласно полученным результатам, корреляция между содержанием антиокислительной присадки (ионол) и значением оптической мутности является наиболее сильной. Чем ниже концентрация ионола в окисленном масле, тем выше значение оптической мутности. Помутнение масла в эксплуатации свидетельствует о появлении в нем коллоидных соединений, укрупнение которых приводит к появлению осадка, ухудшающего отвод тепла от нагретых частей трансформатора и в целом снижающего изоляционные свойства масла. На рис. 6 приведена корреляционная зависимость оптической мутности от концентрации присадки ионола (а), а также суммарного содержания двух фенольных соединений — ионола и 2,6-ДТБФ (б).

Таблица 1

Корреляционная зависимость между физико-химическими показателями качества масла

Показатель	ТАН	КЧ	ОМ	2,6-ДТБФ
Ионол	-0,19	-0,20	-0,84	-0,81

Согласно [14], предельно допустимое значение оптической мутности составляет 40 м^{-1} . При достижении данного значения и выше в масле начинаются опасные для изоляции процессы коллоидообразования [15]. Из полученных данных видно, что значение ОМ, равное 40 м^{-1} , достигается, когда концентрация ионола в масле снижается до 0,02 % масс. (рис. 6а) или при суммарном содержании всех идентифицированных в масле соединений фенольной природы, равном 0,07 % масс. (рис. 6б). Напомним, что граничное значение массовой концентрации ионола в трансформаторном масле составляет 0,1 % масс. При достижении данного уровня концентрации ионола, согласно требованиям СТО [2], необходимо проводить мероприятия по добавлению ионола в масло, например, во время плановых ремонтов трансформаторов. Однако полученные нами данные, указывают на то, что показатели качества масла в эксплуатации начинают ухудшаться только лишь при существенном расходе антиокислительной присадки, а именно при достижении концентрации ионола 0,02 % масс. Несмотря на низкое содержание ионола (0,02 % масс. против ПДЗ=0,1 % масс.), электрофизические показатели качества масла остаются на удовлетворительном уровне, что связано с наличием в масле не только целевого компонента, но и присутствием других соединений фенольного типа, проявляющих антиокислительные свойства [6]. Поэтому при планировании добавления присадки в масло в процессе эксплуатации трансформаторов следует опираться не только на массовую концентрацию ионола, но и на суммарное содержание всех фенольных соединений в масле, а именно ионол и 2,6-ди-*трет*-бутилфенол, которое составляет 0,07 % масс. Для контроля содержания всех фенольных соединений следует рассмотреть возможность введения в практику химических лабораторий электросетевых комплексов экспресс-методики определения присадок в трансформаторных маслах, представленной в настоящей статье, как альтернативный вариант быстрого определения суммарной концентрации фенольных соединений в эксплуатационном масле.

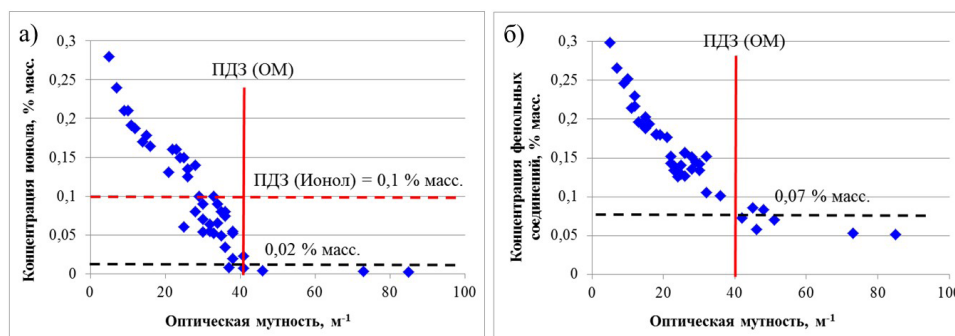


Рис. 6. Зависимость оптической мутности от концентрации присадки ионола (а) и суммарного содержания фенольных соединений — ионола и 2,6-ДТБФ (б)

Заключение. На основании многолетних плановых испытаний трансформаторного масла выявлено большое количество проб масла из баков трансформаторов, в которых содержание антиокислительной присадки (ионол) значительно ниже предельно допустимого значения. Концентрация присадки ниже 0,1 % масс. указывает на практически полную выработку ингибитора окисления в масле и должно сопровождаться ухудшением состояния масла. Однако, несмотря на низкие концентрации ионола, электроизоляционные характеристики масла остаются на высоком эксплуатационном уровне, что противоречит закономерности, ранее выявленной другими исследователями.

Установлено, что удовлетворительное состояние трансформаторного масла в эксплуатации обеспечивается наличием в нем не только традиционной присадки — ионол, но и второго фенольного соединения (2,6-ди-*трет*-бутилфенол). Данное соединение обладает антиокислительными свойствами и продолжает выполнять функции ингибитора.

Разработана и опробована методика количественного определения ионола и продуктов его разложения при одновременном присутствии, базирующаяся на ИК-спектроскопии. Данная методика рекомендована к введению в ежедневную лабораторную практику с целью контроля суммарного содержания фенольных соединений в масле (ионол; 2,6-ди-*трет*-бутилфенол). Реализация данной методики в любой электросетевой лаборатории позволит эффективно проводить измерения суммарного содержания фенольных соединений в масле с минимальным вложением физических и финансовых затрат.

Показано, что, по мере выработки ионола в масле, содержание 2,6-ди-*трет*-бутилфенола возрастает и становится намного больше, чем целевого компонента (ионол). Кроме того, в наибольших количествах образование 2,6-ДТБФ зафиксировано в трансформаторах со «свободным дыханием», что может служить дополнительным индикатором ускоренного старения масла в результате нарушения герметичности пленочной защиты масла от окисления в силовых трансформаторах.

При планировании добавления ионола в эксплуатационное масло следует опираться не только на концентрацию ионола, но и на суммарное содержание других фенольных соединений (ионол; 2,6-ди-*трет*-бутилфенол).

Согласно результатам, полученным в настоящей работе, добавление ионола в эксплуатационное масло с целью предотвращения ухудшения его изоляционных свойств следует проводить при достижении концентрации антиокислительной присадки ионол, равной 0,02 % масс., или при достижении суммарного содержания фенольных соединений (ионол; 2,6-ди-*трет*-бутилфенол) 0,07 % масс.

Библиографический список

1. Rafiq M., Shafique M., Azam A. [et al.]. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // *Molecules*. 2020. Vol. 25 (3901). P. 1–43. DOI: 10.3390/molecules25173901.
2. СТО 34.01-23.1-001–2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Введ. 2017–29–05. Москва: ПАО «Россети», 2017. 262 с.
3. Липштейн Р. А. О механизме действия ингибиторов окисления // *Присадки к маслам: тр. Второго Всесоюз. науч.-техн. совещания*. Москва: Химия, 1968. С. 169–177.

4. Липштейн Р. А., Шахнович М. И. Трансформаторное масло. 3-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 295 с.
5. Лютикова М. Н. Выяснение причины стабильности электрофизических показателей трансформаторного масла из баков измерительных трансформаторов тока // *Промышленная энергетика*. 2020. № 11. С. 2–9.
6. Рогинский В. А. Фенольные антиоксиданты. Реакционная способность и эффективность. Москва: Наука, 1988. 247 с.
7. Лютикова М. Н., Нехорошев С. В., Кукина В. М., Кульков М. Г. Идентификация примесей неизвестного состава в изоляционном масле методом хромато-масс-спектрометрии // *Электрические станции*. 2020. № 6 (1067). С. 47–53. EDN GUICZZ.
8. Лютикова М. Н., Нехорошев С. В., Кульков М. Г. Диагностирование состояния внутренней изоляции высоковольтного оборудования методом хромато-масс-спектрометрии // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24, № 4. С. 118–131. DOI: 10.18721/JEST.24412.
9. Лютикова М. Н. Определение продуктов деструкции ионола в изоляционном нефтяном масле методом газожидкостной хроматографии с пламенно-ионизационным детектором // *Приборы*. 2022. № 12. С. 14–21.
10. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Коновалов А. А., Козлов В. К., Гарифуллин М. Ш. Контроль содержания антиокислительной присадки (ионол) в жидкой изоляции высоковольтного оборудования электросетевых предприятий современными инструментальными методами // *Электрические станции*. 2018. № 12. С. 43–51. EDN YUIWWT.
11. Жидкостная кювета с регулируемой толщиной слоя исследуемой жидкости. URL: http://simex-ftir.ru/product_3-21.html (дата обращения: 15.04.2023).
12. ГОСТ ИЕС 60666-2014. Масла изоляционные нефтяные: обнаружение и определение установленных присадок. Введ. 2016–07–01 // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121828> (дата обращения: 06.05.2022).
13. РМГ 61-2010. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. Введ. 2012–09–01 // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094703> (дата обращения: 06.05.2022).
14. Методические указания по определению оптической мутности трансформаторного масла герметичных вводов 110 кВ и выше силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов: приказ ПАО ЕЭС России № 497 от 07.08.2007. г. Москва: ПАО ЕЭС России. 2007. 16 с.
15. Львов М. Ю. Коллоидно-дисперсные процессы в высоковольтных герметичных вводах трансформаторов // *Электрические станции*. 2000. № 4. С. 49–52.

ЛЮТИКОВА Марина Николаевна, кандидат химических наук, руководитель химической лаборатории Филиала ПАО «Россети» — Ямало-Ненецкое ПМЭС, г. Ноябрьск.

SPIN-код: 7758-4477

AuthorID (РИНЦ): 941492

ORCID: 0000-0002-0824-9025

ResearcherID: T-3409-2018

Адрес для переписки: m.lyutikova@mail.ru

НЕХОРОШЕВ Сергей Викторович, доктор технических наук, главный научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории Ханты-Мансийской государственной медицинской академии, г. Ханты-Мансийск.

AuthorID (РИНЦ): 644160

AuthorID (SCOPUS): 14627428800

ORCID: 0000-0001-9175-2563

ResearcherID: M-5180-2014

Адрес для переписки: nekhoroshevs@yandex.ru

МУРАТОВА Валерия Михайловна, преподаватель
Высшей нефтяной школы Югорского государственного университета (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 5423-5409

AuthorID (РИНЦ): 1075702

ORCID: 0000-0001-9163-7792

Адрес для переписки: kuklinavm@gmail.com

СЕМЕНЮК Павел Романович, студент Института
нефти и газа ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.

Адрес для переписки: s_e_m_k_a@bk.ru

ГАДЖИЕВА Айханум Сеферовна, студентка Высшей нефтяной школы ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 7414-5902

AuthorID (РИНЦ): 1195073

ORCID: 0009-0004-9074-5096

Адрес для переписки: gaukhanoom@bk.ru

Для цитирования

Лютикова М. Н., Нехорошев С. В., Муратова В. М., Семенов П. Р., Гаджиева А. С. О целесообразности контроля содержания фенольных соединений в трансформаторном масле // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 140–148. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-140-148.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023 г.

© М. Н. Лютикова, С. В. Нехорошев, В. М. Муратова,
П. Р. Семенов, А. С. Гаджиева

¹ Branch of PJSC
Federal Grid Company—Rosseti—
Yamalo-Nenets Enterprise
of main power grids,
Noyabrsk, Russia

² Khanty-Mansiysk State
Medical Academy,
Khanty-Mansiysk, Russia

³ Ugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia

ON THE FEASIBILITY OF MONITORING THE CONTENT OF PHENOLIC COMPOUNDS IN TRANSFORMER OIL

It is known that in order to restrain the process of oxidation of transformer oil, and, accordingly, to extend its service life, an antioxidant additive ionol is added to it. Previously, specialists using the method of chromato-mass spectrometry established the fact of the formation of new phenolic compounds in oil along with the consumption of the inhibitory additive ionol, namely, 2,6-di-*tert*-butylphenol (2,6-DTBP) and 2, 6-di-*tert*-*p*-benzoquinone. These phenolic compounds, as well as ionol, belong to the class of sterically hindered phenols, which, in turn, are able to inhibit the oxidation of oil during its operation in oil-filled transformer equipment, in particular, power transformers and current transformers. This article presents results showing that as ionol is consumed, 2,6-di-*tert*-butylphenol accumulates in oil from transformers. To the greatest extent, this trend is noticeable for current transformers equipped with air-drying filters (the so-called "free breathing"). The formation of 2,6-DTBP in oil can serve as an indicator of accelerated aging of the oil as a result of its prolonged contact with atmospheric oxygen. Changes in additive concentrations during oil aging are controlled using a new technique developed by us, based on IR spectroscopy.

Keywords: high voltage transformer, transformer oil, antioxidant additive, phenolic compounds, IR spectroscopy, aging markers.

References

1. Rafiq M., Shafique M., Azam A. [et al.]. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // *Molecules*. 2020. Vol. 25 (3901). P. 1–43. DOI: 10.3390/molecules25173901. (In Engl.).
2. STO 34.01-23.1-001–2017. Ob"yem i normy ispytaniya elektrooborudovaniya [Scope and standards for testing electrical equipment]. Moscow, 2017. 262 p. (In Russ.).
3. Lipshteyn R. A. O mekhanizme deystviya ingibitorov okisleniya [On the mechanism of action of oxidation inhibitors] // Prisdki k maslam. *Oil Additives*. Moscow, 1968. P. 169–177. (In Russ.).
4. Lipshteyn R. A., Shakhnovich M. I. Transformatornoye maslo [Transformer oil]. 3 rd. Moscow, 1983. 295 p. (In Russ.).
5. Lyutikova M. N. Vyyasneniye prichiny stabil'nosti elektrofizicheskikh pokazateley transformatornogo masla iz bakov izmeritel'nykh transformatorov toka [Finding out the reasons for the high frequency of electrophysical indicators of transformer oil from tanks of measuring current transformers] // *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2020. No. 11. P. 2–9. (In Russ.).
6. Roginskiy V. A. Fenol'nyye antioksidanty. Reaktsionnaya sposobnost' i effektivnost' [Phenolic antioxidants. Reactivity and efficacy]. Moscow, 1988. 247 p. (In Russ.).
7. Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Kuklina V. M., Kul'kov M. G. Identifikatsiya primesey neizvestnogo sostava v izolyatsionnom masle metodom khromato-mass-spektrometrii [Identification of impurities of unknown composition in the insulating oil by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2020. No. 6 (1067). P. 47–53. EDN GUICZZ. (In Russ.).
8. Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Kul'kov M. G. Diagnostirovaniye sostoyaniya vnutrenney izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya metodom khromato-mass-spektrometrii [Diagnostics of internal isolation in high-voltage equipment by chromatography and mass spectrometry] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. St. Petersburg Polytechnic University Journal*

of *Engineering Science and Technology*. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 118–131. DOI: 10.18721/JEST.24412. (In Russ.).

9. Lyutikova M. N. Opredeleniye produktov destrukttsii ionola v izolyatsionnom neftyanom masle metodom gazozhidkostnoy khromatografii s plamenno-ionizatsionnym detektorom [Determination of ionol degradation products in insulating petroleum oil by gas-liquid chromatography with a flame ionization detector] // *Pribory. Instruments. Pribory. Instruments*. 2022. No. 12. P. 14–21. (In Russ.).

10. Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M., Konovlov A. A., Kozlov V. K., Garifullin M. Sh. Kontrol' soderzhaniya antiokislitel'noy prisadki (ionol) v zhidkoy izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya elektrosetevykh predpriyatiy sovremennymi instrumental'nymi metodami [Control of the antioxidant additive (Ionol) content in liquid insulation of high-voltage equipment in electric grid enterprises using modern instrumental methods] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2018. No. 12. P. 43–51. EDN YUIWWT. (In Russ.).

11. Zhidkostnaya kyuveta s reguliruyemoy tolshchinoy sloya issleduyemoy zhidkosti [Liquid cuvette with adjustable fluid layer thickness]. URL: http://simex-ftir.ru/product_3-21.html (accessed: 15.04.2023). (In Russ.).

12. GOST IEC 60666-2014. Masla izolyatsionnyye neftyanyye: obnaruzheniye i opredeleniye ustanovlennykh prisadok [Mineral insulating oils. Detection and determination of specified additives]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121828> (accessed: 06.05.2022). (In Russ.).

13. RMG 61-2010. Indicators of accuracy, correctness, precision methods of quantitative chemical analysis. Evaluation methods [State system for ensuring the uniformity of measurements. Accuracy, trueness and precision measures of the procedures for quantitative chemical analysis. Methods of evaluation]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094703> (accessed: 06.05.2022). (In Russ.).

14. Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu opticheskoy mutnosti transformatornogo masla germetichnykh vvodov 110 kV i vyshe silovykh transformatorov i shuchntiruyushchikh reaktorov: prikaz RAO EES Rossii № 497 ot 07.08.2007 g. [Methodological guidelines for determining the optical turbidity of transformer oil of sealed bushings of 110 kV and above power transformers and shunt reactors: Order of RAO UES of Russia No. 497 of 07.08.2007]. Moscow, 2007. 16 p. (In Russ.).

15. L'vov M. Yu. Kolloidno-dispersnyye protsessy v vysokovol'tnykh germetichnykh vvodakh transformatorov [Mineral insulating oils. Detection and determination of specified additives] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2000. No. 4. P. 49–52. (In Russ.).

LYUTIKOVA Marina Nikolayevna, Candidate of Chemical Sciences, Head of Chemistry Laboratory, Branch of PJSC Federal Grid Company – Rosseti – Yamalo-Nenets Enterprise of main power grids, Noyabrsk.

SPIN-code: 7758-4477

AuthorID (RSCI): 941492

ORCID: 0000-0002-0824-9025

ResearcherID: T-3409-2018

Correspondence address: m.lyutikova@mail.ru

NEKHOROSHEV Sergey Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist at the Problematic Research Laboratory, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk.

AuthorID (RSCI): 644160

AuthorID (SCOPUS): 14627428800

ORCID: 0000-0001-9175-2563

ResearcherID: M-5180-2014

Correspondence address: nekhoroshevs@yandex.ru

MURATOVA Valeriya Mikhaylovna, Lecturer at a Higher Oil School, Ugra State University (USU), Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 5423-5409

AuthorID (RSCI): 1075702

ORCID: 0000-0001-9163-7792

Correspondence address: kuklinavm@gmail.com

SEMENYUK Pavel Romanovich, Student of Oil and Gas Institute, USU, Khanty-Mansiysk.

Correspondence address: s_e_m_k_a@bk.ru

GADZHIYEVA Aykhanum Seferovna, Student at a Higher Oil School, USU, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 7414-5902

AuthorID (RSCI): 1195073

ORCID: 0009-0004-9074-5096

Correspondence address: gaykhanoom@bk.ru

For citations

Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Muratova V. M., Semenyuk P. R., Gadzhieva A. S. On the feasibility of monitoring the content of phenolic compounds in transformer oil // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 140–148. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-140-148.

Received April 22, 2023.

© M. N. Lyutikova, S. V. Nekhoroshev, V. M. Muratova, P. R. Semenyuk, A. S. Gadzhieva

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