

ISSN 2073-7408

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ**

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**1 (363) 2024**



Редакция

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук,  
проф.

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегии:

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дунаев А.В. д-р техн. наук, доц. (Россия)

Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запемель Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф.  
(Россия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф.  
(Россия)

Кухарь В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф.  
(Россия)

Ли Шэнбо. канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирсаимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.  
(Азербайджан)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф.  
(Россия)

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Савин Л.А. д-р техн. наук, проф.  
(Россия)

Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.  
(Беларусь)

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный редактор:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>

E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Зарег. в Федеральной службе по  
надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС77-67029

от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504

по объединенному каталогу

«Пресса России»

на сайтах [www.pressa-ru.ru](http://www.pressa-ru.ru) и [www.aks.ru](http://www.aks.ru)

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

Журнал индексируется в системе  
Российского индекса научного цитирования  
РИНЦ, а также в международных системах  
Chemical Abstracts и Google Scholar.

В соответствии с письмом ВАК от 06.12.2022

№02-1198 «О Перечне рецензируемых

научных изданий», журнал

«Фундаментальные и прикладные проблемы

техники и технологии» как издание,

входящее в международную базу данных

Chemical Abstracts, приравнивается к

изданиям категории К1.

Журнал входит 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» ВАК по следующим группам научных специальностей:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки), 2.2.5. Приборы навигации (технические науки), 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), 2.5.2. Машиноведение (технические науки), 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки), 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 2.5.5. Техноложия и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Техноложия машиностроения (технические науки), 2.5.7. Техноложия и машины обработки давлением (технические науки), 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

## Содержание

### Колонка главного редактора

Приветственное слово Голенкова В.А. участникам XXI Международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век» ..... 3

### Теоретическая механика и ее приложения

Павлов В.Д. Моделирование аккумулятора механической энергии ..... 4

Журавлев Д.Н., Боровков А.И. Моделирование изнашивания камневой опоры при действии переменной вертикальной нагрузки ..... 9

### Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Поддубный А.А., Гордон В.А., Семенова Г.А. Динамический отклик системы «балка – двухпараметрическое основание» на внезапное трещинообразование ..... 17

### Машиностроительные технологии и оборудование

Татарканов А. А. Технология плазменных ассистированных напылений для создания многоуровневых покрытий Ti-TiN на рабочих поверхностях регулирующей арматуры ..... 29

Ковалев В.Д., Панков В.П., Радченко С.Ю., Фурсина А.Б., Степанова М.В. Исследования углерод-углеродных материалов с высокими теплозащитными характеристиками. 42

### Машиноведение и мехатроника

Фетисов А.С., Родичев А.Ю., Литовченко М.Г., Шутин Д.В. Экспериментальная оценка характеристик трибонных опор роторов ..... 52

Сытин А.В., Внуков С.С., Серебренников А.Д., Серенко И.А., Сухоручко А.В. Основы расчета упорных лепестковых электромагнитных подшипников с ферромагнитной жидкостью ..... 60

Горин А.В., Поляков Р.Н., Внуков А.В., Родичева И.В., Агашков И.Л. Повышение точности и достоверности полученных результатов при экспериментальных исследованиях узлов с бесконтактными уплотнениями ..... 69

Родичев А.Ю., Иванов О.А., Родичева И.В., Серебряников А.Д., Васильев К.В. Анализ методов машинного обучения в диагностике и обслуживании промышленного оборудования ..... 78

Фетисов А.С. Исследование магнитореологических демпферов сжатия ..... 87

Воробьев В.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. Использование двухслойных резиноталлических шарниров на высокоскоростном подвижном составе ..... 96

### Приборы, биотехнические системы и технологии

Гасанова В.А., Пушкарева А.В. Разработка алгоритма сжатия и передачи данных ЭКГ ритмии в телемедицинских системах ..... 105

Круговой А.Н. Использование двигателей постоянного тока в устройствах сердечно-легочной реанимации ..... 110

Гайнуллина Я.Н., Калинин М.И., Сопин П.К. Особенности проектирования глубоководных сферических оболочек для аппаратов жидкостного дыхания ..... 115

Жидков А.В., Подмастерьев К.В., Денисов Д.В., Немов В.П., Семичев А.В. Исследование корреляции изменения импеданса и скорости кровотока в левой сонной артерии ..... 122

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Ирзаев Г.Х. Управление инженерными изменениями в изделиях радиоэлектронного приборостроения с помощью технологий виртуальной и дополненной реальности ..... 130

### Материалы XXI Международной научно-практической конференции "Энерго- и ресурсосбережение XXI век"

Синюкова Т.В., Мецераков В.Н., Синюков А.В. Использование нечетких регуляторов в системе управления механизмов для смешивания вязких веществ ..... 141

Подмастерьев К.В., Марков В.В., Мишин В.В., Селихов А.В., Углова Н.В. Электрорезистивный метод мониторинга технического состояния, качества, надёжности и безопасности опор качения электрических машин ..... 149

Никольский О.К., Куликова Л.В., Фараносов В.В., Суринский Д.О. Многокритериальная оценка антропогенного риска опасности электроустановок на основе имитационного моделирования ..... 158

Куликова Л.В., Никольский О.К., Халина Т.М., Фараносов В.В. Диагностирование и управление антропогенными рисками опасности электроустановок на объектах АПК ..... 165

Качанов А.Н., Гришин В.А. Анализ факторов, влияющих на эффективность процесса сушки древесины в вакуумно-диэлектрической камере ..... 173

Качанов А.Н., Миронов Е.А. Особенности индукционной закалки крупногабаритных валков прокатных станов ..... 179

Слободина Ю.Н., Рахманкулов Ш.Ф., Воркунов О.В., Гарифуллин М.Ш. Исследование эффективности адсорбционной очистки трансформаторных масел, составленных под воздействием разрядных процессов ..... 185

Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Применение нечетких нейронных сетей для оценки эффективности использования электроэнергии на промышленных предприятиях ..... 193

Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Королева Т.Г. Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтрально напряжением 6-10 кВ ..... 200

Журнал входит 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» ВАК по следующим группам научных специальностей:

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки), 2.2.5. Приборы навигации (технические науки), 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), 2.5.2. Машиноведение (технические науки), 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки), 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 2.5.5. Техноложия и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Техноложия машиностроения (технические науки), 2.5.7. Техноложия и машины обработки давлением (технические науки), 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

## Editorial Committee

### Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

### Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof.

### Member of editorial board:

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dunaev A.V. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Zubchaninov V.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shengbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Azerbaijan)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzhev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.L. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

### Responsible editor:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

### Address

302030, Oryol region, Oryol, st.

Moskovskaya, 34

+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipppt>

E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossi» 29504

on the websites [www.pressa-rl.ru](http://www.pressa-rl.ru)

and [www.aks.ru](http://www.aks.ru)

© Orel State University, 2024

The journal is indexed in the system of the Russian Science Citation Index (RSCI), and also in international systems Chemical Abstracts and Google Scholar.

In accordance with the letter of the Higher Attestation Commission dated December 6, 2022 No. 02-1198 "On the List of Peer-Reviewed Scientific Publications", the journal Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology, as a publication included in the international Chemical Abstracts database, is equated to publications of the K1 category.

## Contents

### Editors Note

Welcome speech by Golenkov V.A. participants of the XXI International Scientific and Practical Conference "Energy and Resource Saving - XXI Century" ..... 3

### Theoretical mechanics and its applications

Pavlov V.D. Modeling of mechanical energy accumulator ..... 4

Zhuravlev D.N., Borovkov A.I. Modeling the wear of a pivot jewel bearing under the action of a variable vertical load ..... 9

### Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

Poddubny A.A., Gordon V.A., Semenova G.A. Dynamic system response "beam – two-parameter foundation" for sudden crack formation ..... 17

### Machine-building technologies and equipment

Tatarkanov A.A. Technology of plasma-assisted spraying to create multi-level TI-TIN coatings on control valve shells ..... 29

Kovalev V.D., Pankov V.P., Radchenko S.Y., Fursina A.B., Stepanova M.V. research of carbon - carbon materials with high heat protective characteristics ..... 42

### Machine Science and Mechatronics

Fetisov A.S., Rodichev A.Yu., Litovchenko M.G., Shutin D.V. Experimental estimation of characteristics tribotronic rotor supports ..... 52

Sytin A.V., Vnukov S.S., Serebrennikov A.D., Serenko I.A., Sukhoruchko A.V. Basics of calculation of thrust lebe electromagnetic bearings with ferromagnetic fluid ..... 60

Gorin A.V., Polyakov R.N., Vmukov A.V., Rodicheva I.V., Agachkov I.L. Creasing the accuracy and reliability of the results obtained during experimental studies of knots with non-contact seals ..... 69

Rodichev A.Yu., Ivanov O.A., Rodicheva I.V., Serebrennikov A.D., Vasiliev K.V. Analysis of machine learning methods in diagnostics and maintenance of industrial equipment ..... 78

Fetisov A.S. Study of magnetorheological squeeze dampers ..... 87

Vorobyev V.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. Using double-layer rubber-metal hinges on high speed rolling stock ..... 96

### Devices, biotechnical systems and technologies

Hasanova V.A., Pushkareva A.V. Development of an algorithm for compression and transmission of ECG arrhythmia data in telemedicine systems ..... 105

Krugovoy A.N. The use of dc motors in cardiopulmonary resuscitation devices ..... 110

Gainullina Ya.N., Kalinin M.I., Sopin P.K. Design features of deep-sea spherical shells for apparatuses liquid breathing ..... 115

Zhidkov A.V., Podmasteryev K.V., Denisov D.V., Nemov V.P., Semichev A.V. Study of the correlation of changes in impedance and blood flow velocity in the left carotid artery ..... 122

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Irzaev G.Kh. Management of engineering changes in radio-electronic instrument products using virtual and augmented reality technologies ..... 130

### Materials of the XXI International scientific and practical conference "Energy and resource saving XXI century"

Sinyukova T.V., Meshcheryakov V.N., Sinyukov A.V. The use of fuzzy regulators in the system of equalization of mechanisms for mixing viscous substances ..... 141

Podmasteryev K.V., Markov V.V., Mishin V.V., Selikhov A.V., Uglova N.V. Electroresistive method for monitoring the technical condition, quality, reliability and safety the supports of rolling of electrical machines ..... 149

Nikolsky O.K., Kulikova L.V., Faranosov V.V., Surinsky D.O. Multi-criteria assessment of anthropogenic hazard risk of electrical installations based on simulation modeling ..... 158

Kulikova L.V., Nikolsky O.K., Khalina T.M., Faranosov V.V. Diagnostics and management of anthropogenic hazard risks of electrical installations at agricultural facilities ..... 165

Kachanov A.N., Grishin V.A. Analysis of factors affecting the efficiency of the wood drying process in a vacuum-dielectric chamber ..... 173

Kachanov A.N., Kachanov N.A., Mironov E.A. Improving the energy efficiency of induction hardening of rolling mills large rolls ..... 179

Slobodina Yu.N., Rakhmankulov Sh.F., Vorkunov O.V., Garifullin M.Sh. Study of adsorption cleaning efficiency of transformer oils aged under the influence of discharge processes ..... 185

Biryulin V.I., Kudelina D.V. Application of fuzzy neural networks for assessing the efficiency of the electricity use in industrial enterprises ..... 193

Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Koroleva T.G. Method for converting a spaced double ground fault to a single phase in networks with an isolated neutral voltage of 6-10 kV ..... 200

The journal is included in the «List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for obtaining the scientific degree of the candidate of sciences, for the academic degree of the doctor of sciences» of the Higher Attestation Commission for the following groups of scientific specialties: 2.2.4. Instruments and measurement methods (by types of measurements) (technical sciences), 2.2.5. Navigation devices (technical sciences), 2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnosing materials, products, substances and the natural environment (technical sciences), 2.2.11. Information-measuring and control systems (technical sciences), 2.2.12. Devices, systems and products for medical purposes (technical sciences), 2.5.2. Mechanical engineering (technical sciences), 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences), 2.5.4. Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences), 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing (technical sciences), 2.5.6. Engineering technology (technical sciences), 2.5.7. Technologies and machines for forming (technical sciences), 2.5.22. Quality control products. Standardization. Organization of production (technical Sciences).



## Колонка главного редактора

Приветственное слово участникам XXI Международной научно-практической конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК" Голенкова Вячеслава Александровича, руководителя научной школы ОГУ им. И.С. Тургенева, члена организационного комитета конференции, доктора технических наук, профессора, лауреата Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники, премии Президента Российской Федерации в области образования, премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, премии Правительства Российской Федерации в области образования, почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации.



Уважаемые дамы и господа, участники XXI Международной научно-практической конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК"(МНПК-2023), выражаю Вам искреннюю симпатию и уважение за активную и результативную работу, а также интересные и содержательные доклады. Считаю важным отметить, что конференция «Энерго- и ресурсосбережение XXI век» традиционно проводится на базе института приборостроения, автоматизации и информационных технологий ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева». Ее основной целью является развитие и популяризация новейших достижений науки, техники, а также передового опыта по внедрению энерго- и ресурсосберегающего оборудования, цифровых технологий в электроэнергетике, электротехнике и других сферах. Далеко не всем известно, что идея проведения конференции принадлежит кафедре электрооборудования и энергосбережения, которая, вот уже как 23 года, методично и целенаправленно организует работу мультидисциплинарных тематических секций, способствуя дальнейшему укреплению и расширению сотрудничества между отечественными и зарубежными специалистами, работающими в области электроэнергетики и электротехники. Я с удовлетворением констатирую тот факт, что, за эти годы конференция сплотила вокруг себя множество единомышленников, благодаря чему она стала известной и востребованной, как в России, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья. Традиционно издаются сборники материалов МНПК (РИНЦ), а лучшие доклады, представляющие научно-практический интерес и прошедшие процедуру двухуровневого независимого рецензирования, вот уже второй год размещаются на страницах журнала «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», входящего в перечень ВАК, а также индексируемого в базе РИНЦ и международных системах цитирования ChemicalAbstracts и GoogleScholar. На мой взгляд, это задает оптимальный темп и правильный вектор развития конференции, способствующих высокой результативности достижения ее основной цели. Искренне надеюсь, что конференция и в будущем будет служить эффективной платформой не только для научных дискуссий и обмена практическим опытом, по актуальным проблемам в области энерго- и ресурсосбережения, но и способствовать интеграции её участников в мировое научно-образовательное пространство.

Желаю всем участникам дальнейшей активной и плодотворной работы, неиссякаемого творческого вдохновения, крепкого здоровья и личного благополучия!

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 531.36

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-4-8

В.Д. ПАВЛОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Аннотация.** Кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов порождают необходимость в аккумулировании механической энергии для ее последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для тягачей на стартовом этапе буксировки тяжелых прицепов. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача и расширить его функциональные возможности. Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплен супермаховик. При подключении машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый двумя дифференциальными уравнениями: одно – для механических величин, другое – для электрических. Размерными параметрами дифференциальных уравнений являются  $J$  – момент инерции супермаховика в совокупности с собственным моментом инерции электрической машины,  $\varphi$  – угловое положение ротора,  $k$  – коэффициент вязкого трения,  $B$  – значение магнитной индукции,  $2l$  – рабочая длина витка якорной обмотки,  $w$  – число витков якорной обмотки,  $D$  – диаметр якоря,  $R$  – активное сопротивление электрической цепи,  $U$  – напряжение источника питания. Решения дифференциальных уравнений повторяют соотношения для зарядки и разрядки электрического конденсатора. Из полученных формул следует, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора. Из этого следует, что в данном случае можно вести речь об искусственной электрической емкости. Кроме того, возникает искусственное электрическое сопротивление (которое не связано с удельным сопротивлением, длиной и площадью сечения проводников). В связи с изложенным аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика. Существуют конструкции супермаховиков, способные запасать существенную кинетическую энергию. Изучалась даже возможность установки их на легковом транспорте. В этом смысле массивные тягачи имеют бесспорное преимущество, поскольку увеличение веса для них не только не проблематично, но в некоторых случаях желательно.

**Ключевые слова:** тягач, нагрузка, буксировка, прицеп, аккумулятор, энергия, электрическая машина.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Павлов В.Д. Начальная динамика тягача с массивными буксируемыми объектами // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2023. № 4. С. 31-37. DOI: 10.14489/hb.2023.04.pp.031-037.
2. Павлов В.Д. Решение задачи трогания многозвенного транспортного средства методами теоретической механики // Вестник НФ БГТУ: мехмат. 2022. Том № 02. № 04 (08). С. 4–14. doi: 10.51639/2713-0657\_2022\_2\_4\_4.
3. Сливинский Е.В., Радин С.Ю., Гридчина И.Н. Исследование пространственных колебаний двухзвенного автопоезда // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 2 (328). С. 83–92.
4. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Оценка энергоемкости минимального принуждения целенаправленного движения объекта // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 1 (351). С. 15–20. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-351-1-15-20.
5. Никитин Ю.Р., Трефилов С.А., Никитин Е.В. Идентифицируемость модели привода мехатронного устройства на базе двигателя постоянного тока по измерительной матрице // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4-1 (336). С. 114–122.
6. Завалишин Н.Н., Николаев Е.В. Устойчивость режимов испытаний тяговых двигателей подвижного состава при различных типах возбуждения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 1 (321). С. 139–145.
7. Дорофеев О.В., Воробьев В.И., Борзенков М.И., Измеров О.В., Злобин С.Н. Тяговый привод локомотивов с высокомоментным коллекторным тяговым электродвигателем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 2 (346). С. 118–129. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-346-2-118-129.
8. Павлов В.Д. Немеханический момент инерции в системе ориентирования космического аппарата // Прикладная физика и математика. 2022. № 3. С. 03–05. DOI: 10.25791/pfim.03.2022.1227.
9. Попов И.П. Электромагнитное устройство для ориентирования космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 2 (40). С. 119-122. doi: 10.26732/j.st.2022.2.06.
10. Загрядцкий В.И., Кобяков Е.Т. Гармонический анализ магнитного поля плоского витка с током в однородной изотропной среде // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2 (286). С. 26–35.

**Павлов Валентин Дмитриевич**

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых  
к.т.н., старший преподаватель кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника»  
600023, Владимир, ул. Вересковая, 17  
89512705065  
pavlov.val.75@mail.ru

---

V.D. PAVLOV

## MODELING OF MECHANICAL ENERGY ACCUMULATOR

**Abstract.** Short-term peak loads of machines and mechanisms create the need to accumulate mechanical energy for its subsequent pulsed use. This is quite relevant, for example, for tractors at the initial stage of towing heavy trailers. The use of a mechanical energy accumulator will reduce the power of the tractor engine and expand its functionality. The mechanical energy accumulator can be made in the form of a direct current electric machine or a valve machine, on the shaft of which a superflywheel is attached. When a machine is connected to a power source, a non-stationary process occurs, described by two differential equations: one for mechanical quantities, the other for electrical quantities. The dimensional parameters of the differential equations are  $J$  - the moment of inertia of the superflywheel in combination with the own moment of inertia of the electric machine,  $\varphi$  - the angular position of the rotor,  $k$  - the coefficient of viscous friction,  $B$  - the value of magnetic induction,  $2l$  - the working length of the armature winding turn,  $w$  - the number of turns of the armature winding windings,  $D$  - armature diameter,  $R$  - active resistance of the electrical circuit,  $U$  - power source voltage. Solutions of differential equations repeat the relationships for charging and discharging an electric capacitor. From the resulting formulas it follows that for an electrical circuit, the mechanical energy accumulator in question is indistinguishable from an electrical capacitor. It follows from this that in this case we can talk about artificial electrical capacitance. In addition, artificial electrical resistance arises (which is not related to the resistivity, length and cross-sectional area of the conductors). In connection with the above, a mechanical energy accumulator can be interpreted as an artificial electric capacitor, which stores not the energy of the electric field, but the kinetic energy of rotation of the superflywheel. There are superflywheel designs that can store significant kinetic energy. Even the possibility of installing them on passenger vehicles was studied. In this sense, massive tractors have an undeniable advantage, since the increase in weight is not only not problematic for them, but in some cases it is desirable.

**Keywords:** tractor, load, towing, trailer, battery, energy, electric machine

## BIBLIOGRAPHY

1. Pavlov V.D. Initial dynamics of a tractor with massive towed objects // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem. 2023. № 4. S. 31-37. DOI: 10.14489/hb.2023.04.pp.031-037.
2. Pavlov V.D. Solution of the problem of starting a multi-link vehicle using theoretical mechanics methods // Vestnik NF BGTU: mekhmat. 2022. Vol № 02. № 04 (08). S. 4–14. doi: 10.51639/2713-0657\_2022\_2\_4\_4.
3. Slivinsky E.V., Radin S.Yu., Gridchina I.N. Study of spatial vibrations of a two-link road train // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2018. № 2 (328). S. 83–92.
4. Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Ryzhkov A.I. Estimation of the energy intensity of minimal compulsion of purposeful movement of an object // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2022. № 1 (351). S. 15–20. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-351-1-15-20.
5. Nikitin Yu.R., Trefilov S.A., Nikitin E.V. Identifiability of the drive model of a mechatronic device based on a DC motor using a measuring matrix // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2019. № 4-1 (336). S. 114–122.
6. Zavalishin N.N., Nikolaev E.V. Stability of test modes for rolling stock traction motors under different types of excitation // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2017. № 1 (321). S. 139–145.
7. Dorofeev O.V., Vorobiev V.I., Borzenkov M.I., Izmerov O.V., Zlobin S.N. Traction drive of locomotives with a high-torque commutator traction motor // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2021. № 2 (346). S. 118–129. DOI: 10.33979/2073-7408-2021-346-2-118-129.
8. Pavlov V.D. Non-mechanical moment of inertia in the orientation system of a spacecraft // Prikladnaya fizika i matematika. 2022. № 3. S. 03–05. DOI: 10.25791/pfim.03.2022.1227.
9. Popov I.P. Electromagnetic device for orienting spacecraft // Kosmicheskiye apparaty i tekhnologii. 2022. Vol. 6. № 2 (40). S. 119-122. doi: 10.26732/j.st.2022.2.06.
10. Zagryadtsky V.I., Kobayakov E.T. Harmonic analysis of the magnetic field of a plane coil with current in a homogeneous isotropic medium // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. 2011. № 2 (286). S. 26–35.

**Pavlov Valentin Dmitrievich**

Vladimir State University A.G. and N.G. Stoletovs  
Ph.D., Senior Lecturer of the Department of "Automation, Mechatronics and Robotics"  
600023, Vladimir, st. Vereskovaya, 17  
89512705065



УДК 539.538

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-9-16

Д.Н. ЖУРАВЛЕВ, А.И. БОРОВКОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ КАМНЕВОЙ ОПОРЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

**Аннотация.** Камневые опоры являются важными узлами конструкции таких роторных систем, как кинетические накопители энергии. На эксплуатационных режимах работы скорости вращения могут достигать сотен оборотов в секунду, а величина вертикальной нагрузки на опорную пару может являться переменной вследствие наличия колебательных процессов. Для оценки ресурса узла трения необходим расчет износа контактной поверхности, который, как показано в данной работе, может быть выполнен основываясь на среднем значении величины нагрузки.

**Ключевые слова:** камневые опоры, износоконтактная задача, переменная вертикальная нагрузка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хандельсман Ю.М. Камневые опоры. – М.: Машиностроение, 1973. 152 с.
2. Stott V. An investigation of problems relating to use of pivots and jewels in instruments and meters. Journal of institution of electrical engineers, vol. 69, issue 414, 1931, pp.751-756. <https://doi.org/10.1049/ji-2.1946.0003>.
3. Shotter G.F. Meter and instrument jewels and pivots. Journal of institution of electrical engineers, vol.93, issue 31, 1946, pp.15-36. <https://doi.org/10.1049/jiee-1.1931.0075>.
4. Liu Q., Tang C., Wu T., Bai Y. Influence of pivot support stiffness on dynamic characteristics of vertical rotor system. Journal of vibroengineering, vol.25, issue 6, 2023, pp.1040-1052. <https://doi.org/10.21595/jve.2023.23136>.
5. Tang C., Su B., Liu X. Dynamic research of a flywheel shafting with PMB and a single point flexible support. Journal of vibroengineering, vol.21, issue 7, 2019, pp.1819-1835. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20675>.
6. Солдатенков И.А. Износоконтактная задача с приложениями к инженерному расчету износа. – М.: Физматкнига, 2010. 160 с.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. 513 с.
8. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
9. Wills G.J. Lubrication Fundamentals. Marcel Dekker Inc., New York, 1980.
10. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. – М.: Физматлит, 2013. 352 с.
11. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content. Wear, 181-183, 1995, pp.443-457. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2).
12. Archard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics, 24 (8), 1953, pp.981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>.
13. Archard J.F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions. Proceedings of the Royal Society, 236 (1206), 1956, pp.397-410. <https://doi.org/10.2307/99967>.
14. Theory Reference. ANSYS Inc. 2020.
15. Stachowiak G.W. Wear – Materials, Mechanisms and Practice. Wiley, 2005.
16. Winner W.O. Wear Control Handbook. ASME, Now York, 1980.
17. Hutchings I, Shipway Ph. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, 2017.
18. Hegadekatte V. et al. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. Tribology International, 41 (11), 2008, pp.1020-1031. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.020>
19. Põdra P., Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method. Tribology International, 32, 1999, pp.71-81. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00012-2)
20. Söderberg A., Andersson S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. Wear, 267, 2009, pp.2243-2251. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.09.004>.
21. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing on oil-bath lubrication for high rotational speed application. Wear, 302, 2013, pp.1506-1513. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.032>.
22. Bastola A., Stewart D., Dini D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear. Wear, 504-505, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204402>.
23. Wang H., Jiang S., Shen Z. The Dynamic Analysis of an Energy Storage Flywheel System with Hybrid Bearing Support. Journal of Vibration and Acoustics, vol. 131, issue 5, 2009, 051006. <https://doi.org/10.1115/1.3147128>.

24. Tang C., Dai X., Zhang X., Jiang L. Rotor dynamics analysis and experiment study of the flywheel spin test system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (9), 2012, pp.2669-2677. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0717-8>.
25. Tang C., Han D., Yang J. Rubbing dynamics behavior of a flywheel shafting with a single point flexible support. *Journal of vibroengineering*, 19 (6), 2017, pp.4138-4154. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18480>
26. Хебда М., Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике. Т.1. Теоретические основы – М.: Машиностроение, 1989. 400 с.
27. Dougherty B. On the average of a function and the mean value theorem for integrals. *Pi Mu Epsilon Journal*, vol.14, no.4, 2016, pp.251-254. <https://jstor.org/stable/48568127>.
28. Kauzlarich J.J., Bhatia K.G., Streitman H.W. Effect of wear on pivot thrust bearings. *ASLE Transactions*, 9 (3), 1966, pp.257-263. <https://doi.org/10.1080/05698196608972142>.

**Журавлев Дмитрий Николаевич**

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург  
 ПИШ «Цифровой инжиниринг»  
 Инженер-исследователь  
 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
 E-mail: zhuravlev@compmechlab.ru

**Боровков Алексей Иванович**

ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург  
 Проректор по цифровой трансформации  
 Руководитель ПИШ «Цифровой инжиниринг»  
 Профессор, к.т.н.  
 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29  
 E-mail: borovkov@compmechlab.ru

D.N. ZHURAVLEV, A.I. BOROVKOV

## MODELING THE WEAR OF A PIVOT JEWEL BEARING UNDER THE ACTION OF A VARIABLE VERTICAL LOAD

**Abstract.** *Pivot jewel bearings are important components of such rotor systems as flywheel energy storage devices. In operational modes, rotation speeds can reach hundreds of revolutions per second, and the magnitude of the vertical load on the support pair may be variable due to the presence of oscillatory processes. To estimate the durability of the friction unit, it is necessary to calculate the wear of the contact surface, which, as shown in this paper, can be performed based on the average value of the load.*

**Keywords:** *pivot jewel bearing, wear-contact problem, variable vertical load.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Khandelsman Yu.M. Jewel bearings. – М.: Mashinostroenie, 1973. 152 s.
2. Stott V. An investigation of problems relating to use of pivots and jewels in instruments and meters. *Journal of institution of electrical engineers*, vol. 69, issue 414, 1931, pp.751-756. <https://doi.org/10.1049/ji-2.1946.0003>.
3. Shotter G.F. Meter and instrument jewels and pivots. *Journal of institution of electrical engineers*, vol.93, issue 31, 1946, pp.15-36. <https://doi.org/10.1049/jiee-1.1931.0075>
4. Liu Q., Tang C., Wu T., Bai Y. Influence of pivot support stiffness on dynamic characteristics of vertical rotor system. *Journal of vibroengineering*, vol.25, issue 6, 2023, pp.1040-1052. <https://doi.org/10.21595/jve.2023.23136>.
5. Tang C., Su B., Liu X. Dynamic research of a flywheel shafting with PMB and a single point flexible support. *Journal of vibroengineering*, vol.21, issue 7, 2019, pp.1819-1835. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20675>.
6. Soldatenkov I.A. Iznosokontaktynaya zadacha s prilozheniyami k inzhenernomu raschetu iznosa. – М.: Fizmatkniga, 2010. 160 s.
7. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie I iznos. — М.: Mashinostroenie, 1977. 513 s.
8. Chichinadze A.V., Braun E.D., Bushe N.A. et al. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka). Pod red. A.V.Chichinadze — М.: Mashinostroenie, 2001. 664 s.
9. Wills G.J. Lubrication Fundamentals. Marcel Dekker Inc., New York, 1980.
10. Popov V.L. Mekhanika kontaktynogo vzaimodeystviya I fizika treniya. – М.: Fizmatlit, 2013. 352 s.
11. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*, 181-183, 1995, pp.443-457. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2).
12. Archard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24 (8), 1953, pp.981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
13. Archard J.F., Hirst W. The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings of the Royal Society*, 236 (1206), 1956, pp.397-410. <https://doi.org/10.2307/99967>.
14. Theory Reference. ANSYS Inc. 2020.
15. Stachowiak G.W. Wear – Materials, Mechanisms and Practice. Wiley, 2005.
16. Winner W.O. Wear Control Handbook. ASME, Now York, 1980.
17. Hutchings I, Shipway Ph. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd Edition. Butterworth-Heinemann, 2017.
18. Hegadekatte V. et al. A predictive modeling scheme for wear in tribometers. *Tribology International*, 41 (11), 2008, pp.1020-1031. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.020>.
19. Pödra P., Andersson S. Simulating sliding wear with finite element method. *Tribology International*, 32, 1999, pp.71-81. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00012-2).

20. Söderberg A., Andersson S. Simulation of wear and contact pressure distribution at the pad-to-rotor interface in a disc brake using general purpose finite element analysis software. *Wear*, 267, 2009, pp.2243-2251. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.09.004>

21. Dai X., Zhang K., Tang C. Friction and wear of pivot jewel bearing on oil-bath lubrication for high rotational speed application. *Wear*, 302, 2013, pp.1506-1513. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.032>

22. Bastola A., Stewart D., Dini D. Three-dimensional finite element simulation and experimental validation of sliding wear. *Wear*, 504-505, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204402>

23. Wang H., Jiang S., Shen Z. The Dynamic Analysis of an Energy Storage Flywheel System with Hybrid Bearing Support. *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 131, issue 5, 2009, 051006. <https://doi.org/10.1115/1.3147128>

24. Tang C., Dai X., Zhang X., Jiang L. Rotor dynamics analysis and experiment study of the flywheel spin test system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (9), 2012, pp.2669-2677. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0717-8>.

25. Tang C., Han D., Yang J. Rubbing dynamics behavior of a flywheel shafting with a single point flexible support. *Journal of vibroengineering*, 19 (6), 2017, pp.4138-4154. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18480>

26. Hebda M., Chichinadze A.V. *Spravochnik po tribotekhnike*. T.I. Teoreticheskie osnovy – M.: Mashinostroenie, 1989. 400 s.

27. Dougherty B. On the average of a function and the mean value theorem for integrals. *Pi Mu Epsilon Journal*, vol.14, no.4, 2016, pp.251-254. <https://jstor.org/stable/48568127>.

28. Kauzlarich J.J., Bhatia K.G., Streitman H.W. Effect of wear on pivot thrust bearings. *ASLE Transactions*, 9 (3), 1966, pp.257-263. <https://doi.org/10.1080/05698196608972142>.

**Zhuravlev Dmitriy Nikolaevich**

St. Petersburg Polytechnic University  
Advanced engineering school “Digital engineering”  
Research engineer  
195251, St. Petersburg, Polytekhnicheskaya st., 29  
E-mail: zhuravlev@compmechlab.ru

**Borovkov Alexey Ivanovich**

St. Petersburg Polytechnic University  
Vice-Rector for Digital Transformation  
Head of AES “Digital engineering”  
Professor, Ph.D.  
195251, St. Petersburg, Polytekhnicheskaya st., 29  
E-mail: borovkov@compmechlab.ru

© Д.Н. Журавлев, А.И. Боровков, 2024

## **МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ**

УДК 539.3

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-17-28

А.А. ПОДДУБНЫЙ, В.А. ГОРДОН, Г.А. СЕМЕНОВА

### **ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СИСТЕМЫ «БАЛКА – ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ» НА ВНЕЗАПНОЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ**

**Аннотация.** Представлена математическая модель собственных изгибных колебаний балки Эйлера-Бернулли, полностью опертой на двухпараметрическое основание Пастернака, инициируемых внезапным образованием дефекта балки в виде открытой поперечной трещины. Решение статической задачи изгиба консольной балки, нагруженной по всей длине равномерно распределенной нагрузкой заданной интенсивности, служит начальным условием процесса вынужденных изгибных колебаний, в ходе которых происходит перераспределение и рост деформаций и напряжений. Вынужденные колебания исследуются путем разложения нагрузки и статического прогиба неповрежденной балки в ряды по формам собственных колебаний балки поврежденной. Определение собственных частот и соответствующих форм перемещений и внутренних усилий в балке проводится методом начальных параметров в сочетании с векторно-матричным представлением состояний произвольных сечений балки. Получены зависимости, связывающие параметры напряженно-деформированного состояния балки с глубиной и локализацией трещины при заданных геометрических и механических характеристиках системы «балка-основание». Для демонстрации возможностей подхода приведены численные примеры.

**Ключевые слова:** балка, основание Пастернака, трещина, фактор внезапности, начальный параметр, вектор состояния, изгибные колебания.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Zhao, X. Green – functions for the forced vibrations of cracked Euler-Bernoulli beams / X. Zhao, Y.R. Zhao, X.Z. Gao, X.Y. Li, Y.H. Li // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2016. – Vol.68, pp.155-175.

2. Mirzabeigy, A. Semi-analytical approach for free vibration analysis of cracked beams resting on two-parameter elastic foundation with elastically restrained ends / A. Mirzabeigy, E.Bakhtiari-Nejad // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol.9, No.2, pp. 191-202.

3. Ghannadial, A. An analytical solution for free vibration of elastically restrained Timoshenko beam on an arbitrary variable Winkler foundation and under axial load / A.Ghannadial, M.Mofid // Latin American Journal of Solid and Structures. 2015. – Vol.12, No.13, pp.2417-2438.
4. Ghannadial, A. Dynamic response of multi-cracked beams resting on elastic foundation / A.Ghannadial, S. KhodapanahAjirlou // International Journal of Engineering – Transactions B: Applications. – 2018. – Vol.31, No.11, pp.1830-1837.
5. Khaijar, A. A discret model for nonlinear vibration of a simply supported cracked beams resting on elastic foundations / A.Khaijar, R. Benamar // Diagnostika. 2017. – Vol.18, No.3, pp.39-46.
6. Attar, M. Free vibration analysis of a cracked shear deformable beam on a two-parameter elastic foundation using a lattice spring model / M. Attar, A. Karrech, K. Regenauer – Lieb // Journal of Sound and Vibration, 333. – 2014. – No.11, pp. 2359-2377.
7. Batihan, A.C. Vibration analysis of a cracked beam on an elastic foundation / Batihan, A.C. and F.S. Kadioglu // International Journal of Structural Stability and Dynamics. – 2016. – Vol.16, No.5, 00066.
8. Поддубный, А.А. Вариант обратной задачи динамики балки на основании Пастернака /Актуальные проблемы математики, информатики и механики / А.А. Поддубный, В.А. Гордон // Сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж, ВГУ. Изд-во «Научно-исследовательские публикации». – 2021. – С.1415-1421.
9. Fwa, T.F. Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis / J. of Transportation engineering. – 1996. – Vol.122. – No.4, pp.323-328.
10. Teodoru, I.B. Beam elements on linear variable two-parameter elastic foundation / I.B. Teodoru, V.Musat // Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. – 2008. – T.LIV. – pp. 69-78.
11. Поддубный, А.А. Динамический отклик системы «балка-основание» на внезапное трещинообразование / А.А. Поддубный, В.А. Гордон, Т.В. Потураева, Д.С. Леонов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – №1(351). – С.40-49.
12. Поддубный, А.А. Вариант обратной задачи динамики балки на основании Пастернака / А.А. Поддубный, В.А. Гордон, Т.В. Потураева, Д.С. Леонов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – №6(350). – С. 10-25.
13. Поддубный, А.А. Собственные поперечные колебания балки на упругом основании Пастернака / А.А. Поддубный, В.А. Гордон // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023. – №3(359). – С.14-32.
14. Ostachowitz, W.M. Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam / W.M. Ostachowitz // J. of Sound and Vibration. – 1991. – 150, № 2, pp. 191-201.
15. Hai-Ping Lin Dynamic design of beams using crack tuning / Hai-Ping Lin // Proc. XV Intern. Congress on Sound and Vibration. – 2008. – Daejeon, Korea. – pp.215-221-7.
16. Поддубный, А.А. Вынужденное колебание балки на упругом основании при внезапном трещинообразовании / А.А. Поддубный, В.А. Гордон, Т.В. Потураева, О.А. Дерли // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – №3(353). – С.15-21.

**Поддубный Алексей Алексеевич**  
 Белорусский государственный  
 университет транспорта, г. Гомель  
 Кандидат физико-математических  
 наук, доцент, начальник  
 факультета  
 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34  
 E  
 m  
 a  
 i

**Гордон Владимир Александрович**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
 Тургенева», г. Орёл  
 Доктор технических наук,  
 профессор, профессор кафедры  
 технической физики и математики  
 2026, г. Орёл, ул. Комсомольская,  
 д. 95  
 Тел. +7 (4862) 41-98-48  
 E-mail: gordon@ostu.ru

**Семёнова Галина Александровна**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
 Тургенева», г. Орёл  
 Кандидат технических наук,  
 доцент, доцент кафедры  
 технической физики и математики  
 302026, г. Орёл, ул.  
 Комсомольская, д. 95  
 Тел. +7 (4862) 41-98-48  
 E-mail: greece-g2011@yandex.ru

A.A. PODDUBNY, V.A. GORDON, G.A. SEMENOVA

## DYNAMIC SYSTEM RESPONSE “BEAM – TWO-PARAMETER FOUNDATION” FOR SUDDEN CRACK FORMATION

**Abstract.** *A mathematical model of the natural bending vibrations of an Euler-Bernoulli beam, completely supported on a two-parameter Pasternak base, initiated by the sudden formation of a beam defect in the form of an open transverse crack, is presented. The solution to the static problem of bending a cantilever beam loaded along its entire length with a uniformly distributed load of a given intensity serves as the initial condition for the process of forced bending vibrations, during which redistribution and growth of strains and stresses occurs. Forced vibrations are studied by decomposing the load and static deflection of an undamaged beam into series according to the modes of natural vibrations of the damaged beam. The determination of natural frequencies and the corresponding forms of displacements and internal forces in the beam is carried out by the method of initial parameters in combination with a vector-matrix representation of the states of arbitrary sections of the beam. Dependencies were obtained that connect the parameters of the stress-strain state of the beam with the depth and localization of the crack for given geometric and mechanical characteristics of the beam-base system. Numerical examples are given to demonstrate the capabilities of the approach.*

**Keywords:** *beam, Pasternak base, crack, surprise factor, initial parameter, state vector, bending vibrations.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Zhao, X. Green – functions for the forced vibrations of cracked Euler-Bernoulli beams / X. Zhao, Y.R. Zhao, X.Z. Gao, X.Y. Li, Y.H. Li // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2016. – Vol.68, pp.155-175.
2. Mirzabeigy, A. Semi-analytical approach for free vibration analysis of cracked beams resting on two-parameter elastic foundation with elastically restrained ends / A. Mirzabeigy, E.Bakhtiari-Nejad // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2014. – Vol.9, No.2, pp. 191-202.
3. Ghannadial, A. An analytical solution for free vibration of elastically restrained Timoshenko beam on an arbitrary variable Winkler foundation and under axial load / A.Ghannadial, M.Mofid // *Latin American Journal of Solid and Structures*. 2015. – Vol.12, No.13, pp.2417-2438.
4. Ghannadial, A. Dynamic response of multi-cracked beams resting on elastic foundation / A.Ghannadial, S. KhodapanahAjirlou // *International Journal of Engineering – Transactions B: Applications*. – 2018. – Vol.31, No.11, pp.1830-1837.
5. Khaijar, A. A discret model for nonlinear vibration of a simply supported cracked beams resting on elastic foundations / A.Khaijar, R. Benamar // *Diagnostika*. 2017. – Vol.18, No.3, pp.39-46.
6. Attar, M. Free vibration analysis of a cracked shear deformable beam on a two-parameter elastic foundation using a lattice spring model / M. Attar, A. Karrech, K. Regenauer – Lieb // *Journal of Sound and Vibration*, 333. – 2014. – No.11, pp. 2359-2377.
7. Batihan, A.C. Vibration analysis of a cracked beam on an elastic foundation / Batihan, A.C. and F.S. Kadioglu // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. – 2016. – Vol.16, No.5, 00066.
8. Poddubny`j, A.A. Variant obratnoj zadachi dinamiki balki na osnovanii Pasternaka /Aktual`ny`e problemy` matematiki, informatiki i mexaniki / A.A. Poddubny`j, V.A. Gordon // *Cb. tr. Mezhdunar. nauch. konf. Voronezh, VGU. Izd-vo «Nauchno-issledovatel`skie publikacii»*. – 2021. – C.1415-1421.
9. Fwa, T.F. Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis / *J. of Transportation engineering*. – 1996. – Vol.122. – No.4, pp.323-328.
10. Teodoru, I.B. Beam elements on linear variable two-parameter elastic foundation / I.B. Teodoru, V.Musat // *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi*. – 2008. – T.LIV. – pp. 69-78.
11. Poddubny`j, A.A. Dinamicheskij otklik sistemy` «balka-osnovanie» na vnezapnoe treshhinoobrazovanie / A.A. Poddubny`j, V.A. Gordon, T.V. Poturaeva, D.S. Leonov // *Fundamental`ny`e i prikladny`e problemy` tekhniki i tekhnologii*. – 2022. – №1(351). – S.40-49.
12. Poddubny`j, A.A. Variant obratnoj zadachi dinamiki balki na osnovanii Pasternaka / A.A. Poddubny`j, V.A. Gordon, T.V. Poturaeva, D.S. Leonov // *Fundamental`ny`e i prikladny`e problemy` tekhniki i tekhnologii*. – 2021. – №6(350). – S. 10-25.
13. Poddubny`j, A.A. Sobstvenny`e poperechny`e kolebaniya balki na uprugom osnovanii Pasternaka / A.A. Poddubny`j, V.A. Gordon // *Fundamental`ny`e i prikladny`e problemy` tekhniki i tekhnologii*, 2023. – №3(359). –S.14-32.14. Ostachowitz, W.M. Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam / W.M. Ostachowitz // *J. of Sound and Vibration*. – 1991. – 150, № 2, pp. 191-201.
15. Hai-Ping Lin Dynamic design of beams using crack tuning / Hai-Ping Lin // *Proc. XV Intern. Congress on Sound and Vibration*. – 2008. – Daejeon, Korea. – pp.215-2221-7.
16. Poddubnyj, A.A. Vynuzhdennoe kolebanie balki na uprugom osnovanii pri vnezapnom treshchinoobrazovanii / A.A. Poddubnyj, V.A. Gordon, T.V. Poturaeva, O.A. Derli // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2022. – №3(353). – S.15-21.

**Poddubny Alexey Alekseevich**  
Belarusian State University  
transport, Gomel  
Ph.D., Associate Professor of the  
Department of Physical and  
Mathematical Sciences, head of  
faculty  
246653, Gomel, st. Kirova, 34  
E-mail: bsut@bsut.by

**Gordon Vladimir Aleksandrovich**  
Orel State University  
Doctor of technical Sciences,  
Professor of the Department of  
technical physics and mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
Phone: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: gordon@ostu.ru

**Semenova Galina Aleksandrovna**  
Orel State University  
Ph.D., Associate Professor of the  
Department of technical physics and  
mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
Phone: +7 (4862) 41-98-48  
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

© А.А. Поддубный, В.А. Гордон, Г.А. Семенова, 2024

## **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 67.017+51.74+67.107

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-29-41

А.А. ТАТАРКАНОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННЫХ АССИСТИРОВАННЫХ НАПЫЛЕНИЙ  
ДЛЯ СОЗДАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПОКРЫТИЙ Ti-TiN  
НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ**

**Аннотация.** В данной статье оцениваются ключевые характеристики многоуровневого специального покрытия системы Ti-TiN, выполненного благодаря плазменному ассистированному напылению. Рассмотрены особенности создания технологической цепочки плазменного ассистированного напыления многоуровневого специального покрытия системы Ti-TiN. Изучение литературы и множества публикаций показало, что хорошие перспективы имеет методика обработки поверхностей по глубоковакуумной ионной плазменной технологии. Данной технологии присущи универсальность, высокая производительность, воспроизводимость характеристик поверхностных слоев, а также экологичность. Независимо от широкой теоретической базы и массы практических наработок, ионная плазменная технология сталкивается с множеством проблем, обусловленных необходимостью модернизации существующей технологии, оптимизации всех операций обрабатывания, повышения эффективности существующих и внедрения принципиально новых методик, повышения эксплуатационной устойчивости напыляемых слоев. По этой причине, целью данной работы – исследование методики ионной плазменной обработки, дополненной операцией ионизации молекулами газов с применением новых технологических решений. Многоуровневые покрытия системы Ti-TiN характеризуются лучшими эксплуатационными показателями относительно просто титановых напылений. Дело в том, что многоуровневым покрытиям, выполненным по рассматриваемой технологии присуще образование фаз  $\alpha$ -Ti и TiN, имеющих различную микротекстуру, к тому же при увеличении количества слоев повышается степень разориентации кристаллитов. Оценка значений ширины и положения рентгеновских пиков, показало, что при повышении числа слоев напряжения в каждом из слоев будут уменьшаться. Наличие таких особенностей, присущих многоуровневым покрытиям, напыленным по методике, описанной в статье, демонстрирует лучшие характеристики термической стойкости, относительно однослойных титановых покрытий. В качестве практической апробации в статье описана разработка технологического процесса плазменного ассистированного напыления покрытия системы Ti-TiN на конкретном изделии.

**Ключевые слова:** методика плазменного ассистированного напыления, нитрид титана, многослойные покрытия, регулирующая арматура.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, И. А. Моделирование и организация технологической среды машиностроительных предприятий: Учебно-методическое пособие / И. А. Александров, С. А. Шептунов, А. Н. Муранов. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2023. – 128 с. – ISBN 978-5-8037-0900-8. – EDN DUPXUU.
2. Агзамов Р.Д. Принципы преобразования поверхностей в глубоких вакуумах высокоточными смещенными разрядами // Наиболее перспективные направления современных видов обработок и формирование оптимальных рабочих характеристик металлов, а также металлических соединений: Сб. тр. / Научн.-тех. конф.-Уфа, 2001 год.-С.280-286.
3. Двухступенчатые глубоковакуумные электрические разряды и основные направления их применения в современных плазменных технологиях / Р.И. Ступак, Л.П. Саблев, В.И. Шелохаев // Доклады четвертой научной технической конференции «Теория глубоковакуумных покрытий-87», Юрмала, 8-10 октября 1987 год – город Рига, 1987 год. С. 181.
4. Коваль Н.Н. Виды генераторов низкотемпературных плазм, а также пучков на базе электрического разряда с пустотелыми анодами / Материалы диссертации, представленные научным докладом. Город Томск, 2000 год. -73 с.
5. Будилов В.В. Принципы электронного обрабатывания материала в глубоких вакуумах повышенными смещенными разрядами / Будилов В.В., Агзамов Р.Д., Киреев Р.М. // Передовое машиностроение: Сб. тр. / Научн.-тех. конф. – Уфа: Гилем, 2001 год.-С.92-101.
6. Крейнделъ Ю.Е., Васильева Г.Г., Эффекты не наполненных катодов в разрядах типа пеннинг // ЖТФ. -1989 год. -Т. XXXIX. -Выпуск 2. -С. 297-302.
7. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Специфика лазерных преобразований металлов. М.: Энергоатомиздат, 1991 год, 236 с.
8. Арзамасов Б. Н., Лахтин Ю. М., Химические и термические виды обрабатывания металлических материалов: Учебное пособие для высших учебных заведений по специальности «Материаловедение, оборудование и технологии термической обработки материалов». -М.: Metallurgical Industry, 1985 год. -255 с.
9. Лебединский О.В., Кострицкий А.И., Комплексное глубоковакуумное покрытие. – М.: Машиностроительная отрасль, 1987 год.-207 с.
10. Струмилова Н.В. Ионно-стимулированные легирования сталей 2002. – 402-403 р.
11. Клубник В.С. Напыления и покрытие: специфика направления, а также ряд основных достижений // Выдержки из докладов, представленных на международной научной технической конференции «Напыления и покрытие – 95 год», город Санкт-Петербург, 1995 год. -С. 2-5.
12. Бабад-Захряпин А.А. Химические и термические виды обрабатывания в медленных разрядах. -М.: Атомиздат, 1974 год-174 с.
13. Рахимов А.С., Велихов Е.П., Ковалев А.С., Ряд физических и химических явлений наблюдаемых в газоразрядных плазмах. - М.: Атомиздат, 1987 год. -311 с.
14. Alexandrov, I. A. Development of an Algorithm for Automated Evaluation of the Operability of Structural Elements of Shut-off Valves / I. A. Alexandrov, A. N. Muranov, M. S. Mikhailov // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and

QM and IS 2021, Yaroslavl, 06–10 сентября 2021 года. – Yaroslavl, 2021. – P. 257-261. – DOI 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642718. – EDN KNOKDN.

15. Alexandrov, I. A. The analysis of ways to increase the durability of shut-off valves loaded elements / I. A. Alexandrov, A. N. Muranov, M. S. Mikhailov // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 225-235. – DOI 10.17277/jamt.2021.03.pp.225-235. – EDN YDDJVV.

16. Коган Я.Д., Лахтин Ю.М., Процесс азотизации сталей. -М.: Машиностроительная отрасль, 1976 год. -255 с.

**Татарканов Аслан Адальбиевич**

Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва

Специалист по направлению «Многоцелевые гусеничные и колесные машины», научный сотрудник

Телефон: +7(499)978-97-93

E-mail: tatarkanov@ikti.ru

---

A.A. TATARKANOV

**TECHNOLOGY OF PLASMA-ASSISTED SPRAYING TO CREATE MULTI-LEVEL TI-TIN COATINGS ON CONTROL VALVE SHELLS**

**Abstract.** *This article evaluates the key characteristics of a multi-level special coating of the Ti-TiN system, made using plasma-assisted spraying. The features of creating a technological chain of plasma-assisted spraying of a multi-level special coating of the Ti-TiN system are considered. A study of the literature and many publications has shown that the method of surface treatment using deep-vacuum ion plasma technology has good prospects. This technology is characterized by versatility, high productivity, reproducibility of the characteristics of surface layers, as well as environmental friendliness. Despite a broad theoretical base and a lot of practical developments, ion plasma technology faces many problems caused by the need to modernize existing technology, optimize all processing operations, increase the efficiency of existing and introduce fundamentally new techniques, and increase the operational stability of sprayed layers. For this reason, the purpose of this work is to study the technique of ion plasma treatment, supplemented by the operation of ionization by gas molecules using new technological solutions. Multi-level coatings of the Ti-TiN system are characterized by better performance indicators compared to simply titanium coatings. The fact is that multi-level coatings made using the technology under consideration are characterized by the formation of  $\alpha$ -Ti and TiN phases with different microtextures; moreover, with an increase in the number of layers, the degree of misorientation of crystallites increases. An assessment of the width and position of the X-ray peaks showed that as the number of layers increases, the stresses in each layer will decrease. The presence of such features inherent in multi-level coatings sprayed using the method described in the articles demonstrates better thermal resistance characteristics relative to single-layer titanium coatings. As a practical test, the article describes the development of a technological process for plasma-assisted coating of a Ti-TiN system coating on a specific product.*

**Keywords:** *plasma-assisted spraying technique, titanium nitride, multilayer coatings, control valves.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Aleksandrov, I. A. Modelirovanie i organizaciya tekhnologicheskoy sredy mashinostroitelnyh predpriyatij: Uchebno-metodicheskoe posobie / I. A. Aleksandrov, S. A. Sheptunov, A. N. Muranov. – Moskva: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu Izdatelstvo «YAnus-K», 2023. – 128 s. – ISBN 978-5-8037-0900-8. – EDN DUPXUU.

2. Agzamov R.D. Principy preobrazovaniya poverhnostej v glubokih vakuumah vysokotochnymi smeshchennymi razryadami // Naibolee perspektivnye napravleniya sovremennyh vidov obrabotok i formirovanie optimalnyh rabochih harakteristik metallov, a takzhe metallicheskih soedinenij: Sb. tr. / Nauchn.-tekh. konf.-Ufa, 2001 god.-S.280-286.

3. Dvuhstupenchatye glubokovakuumnye elektricheskie razryady i osnovnye napravleniya ih primeneniya v sovremennyh plazmennyyh tekhnologiyah / R.I. Stupak, L.P. Sablev, V.I. Shelohaev // Doklady chetvertoj nauchnoj tekhnicheskoy konferencii «Teoriya glubokovakuumnyh pokrytij-87», YUrmala, 8-10 oktyabrya 1987 god – gorod Riga, 1987god. S. 181.

4. Koval N.N. Vidy generatorov nizkotemperaturnykh plazm, a takzhe puchkov na baze elektricheskogo razryada s pustotelymi anodami / Materialy dissertacii, predstavlennye nauchnym dokladom. Gorod Tomsk, 2000 god. -73 s.

5. Budilov V.V. Principy elektronogo obrabatyvaniya materiala v glubokih vakuumah povyshennymi smeshchennymi razryadami / Budilov V.V., Agzamov R.D., Kireev R.M. I peredovoe mashinostroenie: Sb. tr. / Nauchn.-tekh. konf. – Ufa: Gilem, 2001 god.-S.92-101.

6. Krejndel YU.E., Vasileva G.G., Effekty ne napolnennykh katodov v razryadah tipa penning // ZHTF. -1989 god. -T. XXXIX. -Vypusk 2. -S. 297-302.

7. Bykovskij YU.A., Nevolin V.N., Fominskij V.YU. Specifika lazernyh preobrazovaniy metallov. M.: Energoatomizdat, 1991 god, 236 s.
8. Arzamasov B. N., Lahtin YU. M., Himicheskie i termicheskie vidy obrabatyvaniya metallicheskikh materialov: Uchebnoe posobie dlya vysshih uchebnyh zavedenij po specialnosti «Materialovedenie, oborudovanie i tekhnologii termicheskoj obrabotki materialov». - M.: Metallurgicheskaya otrasl, 1985 god. -255 s.
9. Lebedinskij O.V., Kostrzhickij A.I., Kompleksnoe glubokovakuumnoe pokrytie. – M.: Mashinostroitelnaya otrasl, 1987 god.-207 s.
10. Strumilova N.V. Ionno-stimulirovannyye legirovaniya stalej 2002. – 402-403 p.
11. Klubnikin V.S. Napyleniya i pokrytie: specifika napravleniya, a takzhe ryad osnovnyh dostizhenij // Vyderzhki iz dokladov, predstavlenykh na mezhdunarodnoj nauchnoj tekhnicheskoy konferencii «Napyleniya i pokrytie – 95 god», gorod Sankt-Peterburg, 1995 god. -S. 2-5.
12. Babad-Zahryapin A.A. Himicheskie i termicheskie vidy obrabatyvaniya v medlennykh razryadah. -M.: Atomizdat, 1974 god-174 s.
13. Rahimov A.S., Velihov E.P., Kovalev A.S., Ryad fizicheskikh i himicheskikh yavlenij nablyudaemykh v gazorazryadnykh plazmah. - M.: Atomizdat, 1987 god. -311 s.
14. Alexandrov, I. A. Development of an Algorithm for Automated Evaluation of the Operability of Structural Elements of Shut-off Valves / I. A. Alexandrov, A. N. Muranov, M. S. Mikhailov // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 06–10 sentyabrya 2021 goda. – Yaroslavl, 2021. – P. 257-261. – DOI 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642718. – EDN KNOKDN.
15. Alexandrov, I. A. The analysis of ways to increase the durability of shut-off valves loaded elements / I. A. Alexandrov, A. N. Muranov, M. S. Mikhailov // Journal of Advanced Materials and Technologies. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 225-235. – DOI 10.17277/jamt.2021.03.pp.225-235. – EDN YDDJW.
16. Kogan YA.D., Lahtin YU.M., Process azotizacii stalej. -M.: Mashinostroitelnaya otrasl, 1976 god. -255 s.

#### **Tatarkanov Aslan Adalbievich**

Federal State Autonomous Institution of Science Institute for Design-Technological Informatics of RAS, Moscow  
 Specialist degree in the “Tracked and wheeled vehicles”, Researcher  
 Phone number: +7(499)978-97-93  
 E-mail: tatarkanov@ikti.ru

© А. А. Татарканов, 2024

УДК 678.747.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-42-51

В.Д. КОВАЛЕВ, В.П. ПАНКОВ, С.Ю. РАДЧЕНКО, А.Б. ФУРСИНА, М.В. СТЕПАНОВА

## **ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

***Аннотация.** Проведены исследования составов и свойств углерод - углеродных композитов, покрытия на основе SiC для увеличения термоокислительной стойкости тканей, способов регулирования адгезионной прочности, методы прогнозирования структуры и свойств композита.*

***Ключевые слова:** углеродное волокно, композиционный материал, матрица, наполнитель, термоокислительная стойкость, катализатор, структура, свойства, композит.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Панков В. П. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Технологические процессы производства и ремонта летательных аппаратов и авиационных двигателей / В.П. Панков, А.Л. Бабаян, В.И. Табырца, А.А. Швецов // Учебное пособие: Краснодар, Краснодарское ВВАУЛ им. А.К. Серова., 2020 - С. 328.
2. Панков В. П. Материаловедение и технологические процессы в сервисе / В. П. Панков, В. Е. Жидков. – Ставрополь: ООО «Мысль», 2012. – С.337.
3. Панков В.П., Баженов А.В., Панков Д.В., Шепеть И.П. Исследование электропроводности плазменных покрытий на углеродном волокне // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. – № 2 (146). С. 92–96.
4. Панков В.П., Баженов А.В., Панков Д.В., Шепеть И.П. Исследование электромагнитной проницаемости плазменных покрытий на углеродном волокне // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. – № 4 (148). С. 174–179.
5. Ефремов Н.С., Митюшов Е.А., Берестова С.А. Параметрическое описание структуры армированных композитов и построение индикатрис их упругих свойств // Механика композиционных материалов и конструкций. 2008. Том 14, №1. С.16-34.
6. Панков В. П. Совершенствование химико-физических свойств углеродных волокон и тканей за счет модифицирования их поверхности плазмой: монография / В.П. Панков, А.В. Баженов, Д.В. Панков – Москва: АО «Красная звезда», 2022. - 244с.



7. Панков В.П., Степанова М.В., Степанов В.В., Фурсина А.Б. Использование пространственных схем армирования композиционными материалами при конструировании летательных аппаратов. В сборнике: XIII Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 62-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос. Сборник научных статей конференции. Краснодар, 2023. С. 125-131.

8. Панков В.П., Панков Д.В., Фурсина А.Б., Степанова М.В. Исследования дислокационной структуры и динамики краевых дислокаций лопаток турбин авиационных ГТД в процессе эксплуатации. В сборнике: Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского. Сборник научных статей XIII Международной научно-практической конференции. Краснодар, 2023. С. 134-143.

9. Ковалев В.Д., Панков В.П., Радченко С.Ю., Фурсина А.Б., Степанова М.В. Исследования дислокационной структуры лопаток турбин авиационных ГТД в процессе эксплуатации. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 2 (358). С. 48-59.

### **Ковалев Вячеслав Данилович**

Доктор технических наук, профессор  
Начальник отдела АО «Электроавтоматика»  
355016, г. Ставрополь, ул. Заводская, 9  
Тел. 8(918)751-26-72  
E-mail: kwd50@mail.ru

### **Панков Владимир Петрович**

Кандидат технических наук, доцент  
Профессор Краснодарского ВВАУЛ  
350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135  
Тел. 8 (918) 861-09-36  
E-mail: pankovvp61@list.ru

### **Радченко Сергей Юрьевич**

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доктор технических наук, профессор, проректор  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: radsu@rambler.ru

### **Степанова Марина Валерьевна**

Старший преподаватель кафедры  
общеобразовательных дисциплин  
Краснодарского ВВАУЛ  
350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135  
Тел. 8(900)266-98-15  
E-mail: mvs4967@mail.ru

### **Фурсина Ангелина Борисовна**

Кандидат химических наук, доцент  
Доцент кафедры общеобразовательных дисциплин  
Краснодарского ВВАУЛ  
355017, г. Краснодар, ул. Дзержинского, 135  
Тел. 8(918)455-80-98  
E-mail: fursina74@mail.ru

---

V.D. KOVALEV, V.P. PANKOV, S.Y. RADCHENKO, A.B. FURSINA, M.V. STEPANOVA

## **RESEARCH OF CARBON - CARBON MATERIALS WITH HIGH HEAT PROTECTIVE CHARACTERISTICS**

**Abstract.** *Research has been carried out on the compositions and properties of carbon-carbon composites, SiC-based coatings to increase the thermal-oxidative resistance of fabrics, methods for regulating adhesive strength, and methods for predicting the structure and properties of the composite.*

**Keywords:** *carbon fiber, composite material, matrix, filler, thermal-oxidative resistance, catalyst, structure, properties, composite.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Pankov V.P. Materials science and technology of structural materials. Technological processes for the production and repair of aircraft and aircraft engines / V.P. Pankov, A.L. Babayan, V.I. Tabyrtsa, A.A. Shvetsov – Krasnodar, 2020. - 532 p.

2. Pankov V.P. Materials science and technological processes in service. [Text] / V. P. Pankov, V. E. Zhidkov. – Stavropol: LLC “Mysl”, 2012. – 337 p..

3. Pankov V.P. Study of electrical conductivity of plasma coatings on carbon fiber / V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, D.V. Pankov, I.P. Whisper // Strengthening technologies and coatings. – 2017. – No. 2 (146). – pp. 92–96.

4. Pankov V.P. Study of electromagnetic permeability of plasma coatings on carbon fiber / V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, D.V. Pankov, I.P. Whisper // Strengthening technologies and coatings. – 2017. – No. 4 (148). – pp. 174–179.

5. Efremov N.S., Mityushov E.A., Berestova S.A. Parametric description of the structure of reinforced composites and construction of indicators of their elastic properties // Mechanics of composite materials and structures. 2008. Volume 14, No. 1. pp.16 - 34.

6. Pankov V.P. Improving the chemical and physical properties of carbon fibers and fabrics by modifying their surface with plasma: monograph / V.P. Pankov, A.V. Bazhenov, D.V. Pankov - Moscow: Krasnaya Zvezda JSC, 2022. - 244 p.

7. Pankov V.P., Stepanova M.V., Stepanov V.V., Fursina A.B. The use of spatial patterns of reinforcement with composite materials in the design of aircraft. In the collection: XIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, dedicated to the 62nd anniversary of Yu.A.s flight. Gagarin into space. Collection of scientific articles of the conference. Krasnodar, 2023. pp. 125-131.

8. Pankov V.P., Pankov D.V., Fursina A.B., Stepanova M.V. Research of the dislocation structure and dynamics of edge dislocations of aircraft turbine turbine blades during operation. In the collection: Scientific readings named after

Professor N.E. Zhukovsky. Collection of scientific articles of the XIII International Scientific and Practical Conference. Krasnodar, 2023. pp. 134-143.

9. Kovalev V.D., Pankov V.P., Radchenko S.Yu., Fursina A.B., Stepanova M.V. Research of the dislocation structure of aircraft turbine blades during operation. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023. No. 2 (358). pp. 48-59.

**Kovalev Vyacheslav Danilovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Head of Department of JSC "Electroavtomatika"  
355016, Stavropol, Zavodskaya Str., 9  
Tel. 8(918)751-26-72  
E-mail kwd50@mail.ru

**Pankov Vladimir Petrovich**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Professor of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar, Dzerzhinskogo str. 135  
Tel. 8(918)861-09-36  
E-mail: pankowp61@list.ru

**Radchenko Sergey Yurievich**  
«Orel State University», Orel  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Vice-Rector  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: radsu@rambler.ru

**Stepanova Marina Valeryevna**  
Senior teacher of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar, Dzerzhinskogo str. 135  
Tel. 8(918)861-09-36  
E-mail: mvs4967@mail.ru

**Fursina Angelina Borisovna**  
Candidate of Chemical Sciences,  
Associate Professor, Associate Professor  
of the Department of General Education  
Disciplines of Krasnodar VVAUL  
350090, Krasnodar, Dzerzhinskiy str., 135  
Tel. 8(918)455-80-98  
E-mail: fursina74@mail.ru

© В.Д. Ковалев, В.П. Панков, С.Ю. Радченко, А.Б.Фурсина, М.В. Степанова, 2024

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 53.08

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-52-59

А.С. ФЕТИСОВ, А.Ю. РОДИЧЕВ, М.Г. ЛИТОВЧЕНКО, Д.В. ШУТИН

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОТРОННЫХ ОПОР РОТОРОВ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований характеристик роторно-опорных систем на триботронных опорах. На основе теоретически рассчитанных процедурами параметрического синтеза конфигураций активно смазываемых гидростатодинамических опор жидкостного трения были спроектированы экспериментальные образцы подшипников и протестированы на соответствие заданным параметрам трения и силовым характеристикам. На основе созданных для этих целей экспериментальных стендов были проведены измерения параметров переходного процесса в ответ на импульсное воздействие на ротор; измерения момента трения подшипника; косвенные измерения максимальной управляющей силы в активных опорах. На основе представленных данных сделаны выводы об адекватности разработанной методики и валидности инструментальных средств параметрического синтеза триботронных опор роторов.

**Ключевые слова:** триботронная опора, оптимальное проектирование, физический эксперимент, экспериментальные установки, момент трения, переходные процессы, управление положением вала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00789, <https://rscf.ru/project/22-19-00789/>.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. - 2006. – Vol. 48. - p. 1341-1351.
2. Lu K., Jin Yu., Chen Yu., Yang Y., Hou L., Zhang Z., Li Z., Fu Ch. Review for order reduction based on proper

orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2019. – Vol. 123. – p. 264-297.

3. Lu K., Jin Yu., Huang P., Zhang F., Zhang H., Fu Ch., Chen Yu. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2021. – Vol.150. – 107236.

4. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.

5. Майоров С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.

6. Li S., Babin A., Shutin D., Kazakov Yu., Liu Y., Chen Z., Savin L. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning // Tribology International. - 2022. – Vol.175. – 107805.

7. Wang, Nenzi, Ho, Chang-Li, Cha, Kuo-Chiang Engineering Optimum Design of Fluid-Film Lubricated Bearings. TRIBOLOGY TRANSACTIONS. – 2000. – Vol.43. p. 377-386.

8. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева №5(361) – 2023. С.72 – 80.

9. Патент № 2734066 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/04. Установка для исследования роторных систем с активным управлением: № 2019142068: заявл. 16.12.2019: опубл. 12.10.2020 / А. В. Корнаев, А. Ю. Родичев, Л. А. Савин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования " Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева " (ОГУ им. И.С. Тургенева). – EDN ХКYYHC.

10. Патент № 2733996 С1 Российская Федерация, МПК G01M 13/04. Установка для исследования роторных систем с многозонной подачей смазочного материала: № 2019142067: заявл. 16.12.2019: опубл. 09.10.2020 / Е. П. Корнаева, А. Ю. Родичев, А. С. Фетисов, Ю. Н. Казаков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ У

Н 11. А.С. Фетисов Генетические алгоритмы для оптимального проектирования триботронных опор роторов / А.С. Фетисов, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. - №4 (360). – С. 230-240.

Е 12. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.

И 13. Shutin, Denis, Fetisov, Alexander, Savin, Leonid Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. – 2023. - 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.

Е 14. A. Fetisov Application of evolutionary algorithms to the optimal design of non-circular actively lubricated bearings / Fetisov A., Litovchenko M., Shutin D // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – 11 С.

15. Mechanical vibration — Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. - ISO 4839-1:2018. – 22 P.

м 16. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) и 2023. С.108 – 116.

17. Фетисов, А. С. Исследование точности измерений виброперемещений ротора / А. С. Фетисов, Д. В. Шутин, М. Н. Сметанин // X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием имени академика А.Г. Шипунова: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием имени академика А.Г. Шипунова, Ливны, 24 марта 2023 года. – Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2023. – С. 67-71. – EDN KINKRY.

Т **Фетисов Александр Сергеевич**  
УФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Рассистент кафедры мехатроники, механики и  
Робототехники

Н **Литовченко Максим Геннадьевич**  
ЕФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
ВСтудент кафедры мехатроники, механики и  
Аробототехники

**Родичев Алексей Юрьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники

**Шутин Денис Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Доцент кафедры мехатроники, механики и  
робототехники  
E-mail: rover.ru@gmail.com

A.S. FETISOV, A.YU. RODICHEV, M.G. LITOVCHENKO, D.V. SHUTIN

## EXPERIMENTAL ESTIMATION OF CHARACTERISTICS TRIBOTRONIC ROTOR SUPPORTS

**Abstract.** The article presents the results of experimental study of the characteristics of «rotor-bearing» systems on tribotronic supports. Based on the configurations of actively lubricated hydrostatodynamic fluid film bearings

*theoretically calculated by parametric synthesis procedures, experimental bearing samples were designed and tested for compliance with the specified friction parameters and power characteristics. Based on experimental stands created for these purposes, measurements of the parameters of the transient process were carried out in response to a impulse action on the rotor; bearing friction torque measurements; indirect measurements of maximum control force in active bearings. Based on the presented data, conclusions were drawn about the adequacy of the developed methodology and the validity of the tools for the parametric synthesis of tribotronic rotor supports.*

**Keywords:** tribotronic support, optimal design, physical experiment, experimental setups, friction moment, transient processes, shaft position control.

## BIBLIOGRAPHY

1. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. - 2006. – Vol. 48. - p. 1341-1351.
2. Lu K., Jin Yu., Chen Yu., Yang Y., Hou L., Zhang Z., Li Z., Fu Ch. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2019. – Vol. 123. -p.264-297.
3. Lu K., Jin Yu., Huang P., Zhang F., Zhang H., Fu Ch., Chen Yu. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2021. – Vol.150. – 107236.
4. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
5. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
6. Li S., Babin A., Shutin D., Kazakov Yu., Liu Y., Chen Z., Savin L. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning // Tribology International. - 2022. – Vol.175. – 107805.
7. Wang, Nenzi, Ho, Chang-Li, Cha, Kuo-Chiang Optimum Design of Fluid-Film Lubricated Bearings. TRIBOLOGY TRANSACTIONS. – 2000. – Vol.43. p. 377-386.
8. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 72 – 80.
9. Patent No. 2734174 C1 Russian Federation, IPC F16C 19/00, F16C 19/52, G01M 13/04. mechatronic rolling bearing: No. 2019142066: appl. 12/16/2019: publ. 10/13/2020 / A. Yu. Rodichev, A. V. Gorin, R. N. Polyakov [etc.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev" (OSU named after I.S. Turgenev). – EDN UJRABD.
10. Patent No. 2733996 C1 Russian Federation, IPC G01M 13/04. Installation for studying rotor systems with multi-zone lubricant supply: No. 2019142067: application. 12/16/2019: publ. 10/09/2020 / E. P. Kornaeva, A. Yu. Rodichev, A. S. Fetisov, Yu. N. Kazakov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "ORYOL STATE UNIVERSITY NAMED AFTER I.S. TURGENEV" (OSU named after I.S. Turgenev). – EDN XAHOTM.
11. A.S. Fetisov Genetic algorithms for the optimal design of tribotronic rotor supports / A.S. Fetisov, M.G. Litovchenko, D.V. Shutin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2023. - No. 4 (360). – pp. 230-240.
12. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
13. Shutin, Denis, Fetisov, Alexander, Savin, Leonid Optimization of Journal Bearings Considering Their Adjustable Design and Rotor Dynamics. – 2023. - 10.1007/978-3-031-40459-7\_24.
14. A. Fetisov Application of evolutionary algorithms to the optimal design of non-circular actively lubricated bearings / Fetisov A., Litovchenko M., Shutin D // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2024. – 11 C.
15. Mechanical vibration - Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. - ISO 14839-1:2018. – 22 P.
16. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
17. Fetisov, A. S. Study of the accuracy of measurements of rotor vibration movements / A. S. Fetisov, D. V. Shutin, M. N. Smetanin // X All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation named after Academician A.G. Shipunova: materials of the X All-Russian scientific and practical conference with international participation named after academician A.G.

### **Fetisov Alexander Sergeevich**

Orel State University,  
Assistant of the Department of Mechatronics, Mechanics  
and Robotics  
E-mail: fetisov57rus@mail.ru

### **Litovchenko Maksim Gennadievich**

Orel State University  
Student of the Department of Mechatronics, Mechanics  
and Robotics  
E-mail: yamaks123@bk.ru

### **Rodichev Alexey Yurievich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department of Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
E-mail: rodfox@yandex.ru

### **Shutin Denis Vladimirovich**

Orel State University,  
Associate Professor of the Department of Mechatronics,  
Mechanics and Robotics  
E-mail: rover.ru@gmail.com

А.В. СЫТИН, С.С. ВНУКОВ, А.Д. СЕРЕБРЕННИКОВ, И.А. СЕРЕНКО, А.В. СУХОРУЧКО

## ОСНОВЫ РАСЧЕТА УПОРНЫХ ЛЕПЕСТКОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

**Аннотация.** В статье писана проблема опор высокоскоростных осевых турбомашин с вертикальным расположением ротора. Для решения проблемы предложена конструкция нового вида упруго-демпферных комбинированных опор скольжения, объединяющая в себе применение реомагнитных жидкостей и упорных лепестковых подшипников. Предложена математическая модель расчета турбулентного течения смазочного материала в упорной части лепесткового подшипника. Представлены расчетные схемы подшипника, функция зазора в смазочном слое подшипника, уравнение Рейнольдса и деформаций упругих элементов. На основании этого разработана конструкция лепесткового подшипника с электромагнитным воздействием на реомагнитный смазочный материал. Описан принцип работы ферромагнитного демпферного устройства. Сделаны выводы и предложены потенциальные сферы применения устройства.

**Ключевые слова.** упорный лепестковый подшипник скольжения, магнитная гидродинамика, реомагнитная жидкость, минимизация износа, магнитная вязкость, динамические характеристики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хохлов, А. Распределенная энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов [и др.]. – Москва: Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2017.
2. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебрянников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
3. Майоров С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 –С.73-82.
4. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
5. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебрянников, К.В. Смирнова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
6. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебрянников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
7. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
8. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
9. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
10. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.
11. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356)–2022. С.83–91.

12. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.
13. Родичев, А.Ю. Экспериментальный узел лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / А.Ю. Родичев, А.В. Внуков, И.В. Родичева, К.В. Васильев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.59 – 65.
14. Бушуева К. А. Деформация горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке в магнитном поле: дис. ... канд. физ.-мат. наук /К.А. Бушуева, Пермь, 2014. 109 с.
15. Ghaffari Ali. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, Mashid Ashtiani // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26 (8). P. 881 – 904.
16. Kordonsky W. Elements and devices based on magnetorheological effect / W. Kordonsky // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1993. Vol. 4. P. 65 – 69.
17. Tipei, N. Theory of lubrication with ferrofluids: Application to short bearings / Nicolae Tipei / Journal of Lubrication technology. 1982. Vol. 103. P. 510 – 515.
18. Keith D. Weiss Viscoelastic properties of magneto- and electro-rheological fluids / Keith D. Weiss, J. David Carlson, Donald A. Nixon // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1994. Vol. 5. P. 772 – 775.
19. Osman, T. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluids / T.A. Osman, G.S. Nada, Z.S. Safar // Tribology Int. 2001. Vol. 34. P. 369 – 380.
20. Григолюк, Э. И..Контактные задачи теории пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, В. М. Толкачев. М.: Машиностроение, 1980. 411 с.
21. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.

**Сытин Антон Валерьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
канд. техн. наук, доцент кафедры  
кафедры мехатроники, механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: sytin@mail.ru

**Внуков Сергей Сергеевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
аспирант  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: bibikar@internet.ru

**Серебренников Артем Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: silver 57@mail.ru

**Серенко Илья Александрович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: Ilyaserenko@gmail.com

**Сухоручко Алексей Валерьевич**

ООО НТЦ «АПМ»  
Руководитель отдела прочностных расчетов  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 5  
E-mail: sukhoruchko@apm.ru

---

A.V. SYTIN, S.S. VNUKOV, A.D. SEREBRNIKOV, I.A. SERENKO, A.V. SUKHORUCHKO

## **BASICS OF CALCULATION OF THRUST LEBE ELECTROMAGNETIC BEARINGS WITH FERROMAGNETIC FLUID**

**Abstract.** *The problem of supports for high-speed axial turbomachines with a vertical rotor is described. To solve the problem, the design of a new type of elastic-damper combined sliding bearings has been proposed, combining the use of rheomagnetic fluids and thrust leaf bearings. A mathematical model for calculating the turbulent flow of lubricant in the thrust part of a leaf bearing is proposed. Calculation diagrams of the bearing, the function of the gap in the lubricating layer of the bearing, the Reynolds equation and the deformation of elastic elements are presented. Based on this, a design of a leaf bearing with electromagnetic action on rheomagnetic lubricant has been developed. The operating principle of a ferromagnetic damper device is described. Conclusions are drawn and potential areas of application of the device are proposed.*

**Keywords:** *thrust blade bearing, magnetic hydrodynamics, rheomagnetic fluid, wear minimization, magnetic viscosity, dynamic characteristics.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Khokhlov, A. Distributed energy in Russia: development potential / A. Khokhlov, Yu. Melnikov, F. Veselov [etc.]. – Moscow: Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO, 2017.
2. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
3. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
4. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
5. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 5 (361)–2023. P. 72–80.
6. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
7. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
8. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
9. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
10. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
11. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
12. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96.
13. Rodichev, A.Yu. Experimental unit of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / A.Yu. Rodichev, A.V. Vnukov, I.V. Rodicheva, K.V. Vasiliev // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev* No. 5 (361) – 2023. P. 59 – 65.
14. Bushueva K. A. Deformation of a horizontal layer of ferrofluid on a liquid substrate in a magnetic field: dis....cand. physics and mathematics Sciences /K.A. Bushueva, Perm, 2014. 109 p.
15. Ghaffari Ali. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, Mashid Ashtiani // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015. Vol. 26 (8). P. 881 – 904.
16. Kordonsky W. Elements and devices based on magnetorheological effect / W. Kordonsky // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1993. Vol. 4. P. 65 – 69.
17. Tipei, N. Theory of lubrication with ferrofluids: Application to short bearings / Nicolae Tipei / *Journal of Lubrication technology*. 1982. Vol. 103. P. 510 – 515.
18. Keith D. Weiss Viscoelastic properties of magneto- and electro-rheological fluids / Keith D. Weiss, J. David Carlson, Donald A. Nixon // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1994. Vol.5.P.772–775.
19. Osman, T. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluids / T.A. Osman, G.S. Nada, Z.S. Safar // *Tribology Int*. 2001. Vol. 34. P. 369 – 380.
20. Grigolyuk, E. I. Contact problems of the theory of plates and shells / E. I. Grigolyuk, V. M. Tolkachev. M.: Mechanical Engineering, 1980. 411 p.
21. Zhuravlev Yu.N. Active magnetic bearings: theory, calculation, application / Yu.N. Zhuravlev. St. Petersburg: Politekhnik, 2003. 206 p.

**Sytin Anton Valerievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
candidate of technical sciences, associate professor of the  
department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

**Vnukov Sergei Sergeevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
graduate student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: ilyaserenko@gmail.com

E-mail: sitin@mail.ru

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**  
Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: silver57@mail.ru

**Serenko Ilya Alexandrovich**  
Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: ilyaserenko@gmail.com

**Sukhoruchko Alexey Valerievich**  
ООО NTC "APM"  
Head of Strength Calculations Department  
302020, Orel, Naugorskoe highway, 5  
E-mail: sukhорuchko@apm.ru

© А.В. Сытин, С.С. Внуков, А.Д. Серебренников, И.А. Серенко, А.В. Сухоручко, 2024

УДК 621.822

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-69-77

А.В. ГОРИН, Р.Н. ПОЛЯКОВ, А.В. ВНУКОВ, И.В. РОДИЧЕВА, И.Л. АГАШКОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ УЗЛОВ С БЕСКОНТАКТНЫМИ УПЛОТНЕНИЯМИ

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос повышения точности и достоверности полученных экспериментальных результатов исследования узлов с бесконтактными уплотнениями. Описывается принципиальная схема контрольно-измерительной системы получения экспериментальных данных. Выполнен подбор элементной базы контрольно-измерительной системы. Предложен программный код для микроконтроллера. Показаны зависимости физических величин от погрешности. Представлены выводы и рекомендации рациональной корректировке эксперимента, позволяющей сократить время его проведения и свести к минимуму ошибки.

**Ключевые слова:** бесконтактное уплотнение, подшипник, эксперимент, погрешность, параметр, достоверность, давление.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков, Р.Н. Исследование лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / Р.Н. Поляков, А.В. Внуков, М.А. Токмакова, И.В. Родичева // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6 (350) – 2021. С.71 – 77.
2. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
3. Майоров, С.В. Исследование динамики ассиметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
4. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
5. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
6. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.



7. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.

8. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.

9. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.

10. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.

11. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.

12. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.

13. Родичев, А.Ю. Экспериментальный узел лабиринтных уплотнений в мехатронных механизмах / А.Ю. Родичев, А.В. Внуков, И.В. Родичева, К.В. Васильев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.59 – 65.

### **Горин Андрей Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
канд. техн. наук, доцент  
кафедры мехатроники, механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

### **Внуков Алексей Васильевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
соискатель  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

### **Поляков Роман Николаевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
доктор. техн. наук, доцент  
заведующий кафедрой мехатроники,  
механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: romanpolak@mail.ru

### **Родичева Ирина Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
аспирант  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

### **Агашков Илья Леонидович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: rodfox@yandex.ru

---

A.V. GORIN, R.N. POLYAKOV, A.V. VNUKOV, I.V. RODICHEVA, I.L. AGACHKOV

## **CREASING THE ACCURACY AND RELIABILITY OF THE RESULTS OBTAINED DURING EXPERIMENTAL STUDIES OF KNOTSWITH NON-CONTACT SEALS**

**Abstract.** *The article discusses the issue of increasing the accuracy and reliability of the obtained experimental results of studying units with non-contact seals. The schematic diagram of the control and measurement system for obtaining experimental data is described. The selection of the element base of the control and measuring system has been carried out. A program code for a microcontroller is proposed. Dependences of physical quantities on error are shown. Conclusions and recommendations for rational adjustment of the experiment are presented, allowing to reduce the time of its implementation and minimize errors.*

**Keywords:** *non-contact seal, bearing, experiment, error, parameter, reliability, pressure.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Polyakov, R.N. Study of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / R.N. Polyakov, A.V. Vnukov, M.A. Tokmakova, I.V. Rodicheva // Fundamental and applied problems of engineering and technology - Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (350) – 2021. P.71 – 77.

2. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
3. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
4. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
5. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361)–2023. P. 72 – 80.
6. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
7. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.
8. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
9. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
10. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
11. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
12. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96.
13. Rodichev, A.Yu. Experimental unit of labyrinth seals in mechatronic mechanisms / A.Yu. Rodichev, A.V. Vnukov, I.V. Rodicheva, K.V. Vasiliev // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 59 – 65.

**Polyakov Roman Nikolaevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
 doctor of technical Sciences, associate professor of the  
 department mechatronics, mechanics and robotics  
 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
 E-mail: romanpolak@mail.ru

**Gorin Andrei Vladimirovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
 candidate of technical Sciences, associate professor of  
 the department mechatronics, mechanics and robotics  
 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
 E-mail: gorin57@mail.ru

**Vnukov Alexey Vasilevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
 applicant  
 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
 E-mail: rodfox@yandexl.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
 graduate student  
 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
 E-mail: rodfox@yandex.ru

**Agashkov Ilya Leonidovich**

student  
 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
 E-mail: rodfox@yandex.ru

© А.В. Горин, Р.Н. Поляков, А.В. Внук, И.В. Родичева, И.Л. Агашков, 2024

УДК 62-932.4

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-78-86

А.Ю. РОДИЧЕВ, О.А. ИВАНОВ, И.В. РОДИЧЕВА, А.Д. СЕРЕБРЯНИКОВ, К.В. ВАСИЛЬЕВ

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ДИАГНОСТИКЕ  
 И ОБСЛУЖИВАНИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Аннотация.** В статье изложен анализ методов машинного обучения в диагностике и обслуживании промышленного оборудования. В результате проведённого анализа было рассмотрено понятие «Индустрии 4.0», основные стратегии обслуживания, основные методы / модели машинного обучения, рассмотрены их преимущества и недостатки при прогнозировании возможных неисправностей в результате автоматизации процесса и анализа больших объёмов данных. Детальный анализ и сравнения методов машинного обучения позволил разработать новую концепцию системы предиктивной диагностики и определить вектор дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** методы, машинное обучение, обслуживание; диагностика; нейронные сети, алгоритмы работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. What are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR? - McKinsey & Company - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir>
2. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №1(357) – 2023. С.133 – 140.
3. Майоров, С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) -2022 – С. 73-82.
4. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демпфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(355) – 2022. С.51 – 58.
5. Сытин, А.В. Расчет характеристик упорного лепесткового газодинамического подшипника совместным решением задач газодинамики и теории упругости / А.В. Сытин, С.А. Власова, А.Д. Серебренников, К.В. Смирнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №5(361) – 2023. С.72 – 80.
6. Сытин, А.В. Расчет характеристик радиального лепесткового газодинамического подшипника с изменяемой геометрией опорной поверхности / А.В. Сытин, С.А. Власова, И.А. Серенко, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.108 – 116.
7. Родичев, А.Ю. Система мониторинга состояния узлов и агрегатов промышленного оборудования / А.Ю. Родичев, А.В. Горин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(362) – 2023. С.101 – 108.
8. Шутин, Д.В. Управление сервоклапанами для реализации активной смазки гидростатодинамических подшипников / Д.В. Шутин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(359) – 2023. С.137 – 144.
9. Шутин, Д.В. Анализ точности показаний датчиков перемещений при определении положения ротора в опорах жидкостного трения / Д.В. Шутин, А.С. Фетисов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.103 – 110.
10. Горин, А.В. Анализ методов управления и классификаций для диагностирования аномальных состояний / А.В. Горин, Р.К. Зарецкий, А.К. Поздняков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №3(353) – 2022. С.59 – 67.
11. Фетисов, А.С. Экспериментальный анализ точности определения положения ротора в опорах жидкостного трения / А.С. Фетисов, Д.В. Шутин, М.Н. Сметанин, К.К. Настепанин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.83 – 91.
12. Родичев, А.Ю. Исследование возможности применения искусственных нейронных сетей для диагностики роторно-опорных узлов / А.Ю. Родичев, Р.Н. Поляков, К.В. Васильев, Е.М. Минаева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии - Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева - №6(356) – 2022. С.91 – 96.
13. Theissler, A., Pérez-Velázquez, J., Kettelgerdes, M. and Elger, G., 2021. Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry. Reliability engineering & system safety, 215, p.107864.
14. Chaudhuri, P.R., Rashid, R.B., & Ejaz, W. (2023). Multi-Microcontroller Sensor Data Acquisition to Enhance UAV Attitude Control, Predictive Maintenance, and Healthcare Solutions. 2023 IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), 0771-0777.
15. Fernandes, J., Reis, J., Melo, N.F., Teixeira, L., & Amorim, M. (2021). The Role of Industry 4.0 and BPMN in the Arise of Condition-Based and Predictive Maintenance: A Case Study in the Automotive Industry. Applied Sciences, 11, 3438.
16. Заявка на изобретение № 2023119668 от 25.07.2023. Интеллектуальная опора скольжения. Родичев А. Ю., Иванов О.А., Родичева И.В., Поздняков А.К., Горин А.В.
17. Заявка на изобретение № 2023128243 от 30.10.2023. Устройство для диагностики роторных систем. Родичев А. Ю., Иванов О.А., Родичева И.В., Поздняков А.К., Горин А.В.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023665005 Российская Федерация. Прошивка микроконтроллера для мониторинга состояния подшипниковых узлов скольжения в

режиме реального времени / О.А. Иванов, А.Ю. Родичев, А.К. Поздняков, И.В. Родичева; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева. - № 2023663340; заявл. 26.06.2023; опубл. 11.07.2023

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023687914 Российская Федерация. Программа приема, хранения и обработки данных, получаемых от IoT датчиков промышленного оборудования по протоколу MQTT / А.Ю. Родичев, О.А. Иванов, И.В. Родичева, К.В. Васильев, Д.В. Толкачева; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С. Тургенева. - № 2023687359; заявл. 06.12.2023; опубл. 19.12.2023

**Родичев Алексей Юрьевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
Адрес: 302030, Россия, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
К.т.н., доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Родичева Ирина Владимировна**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
Адрес: Россия, 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Аспирант  
E-mail: irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

**Серебrennikov Артем Дмитриевич**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
Адрес: 302020, Россия, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Студент  
E-mail: silver57.93@mail.com

**Иванов Олег Анатольевич**

Национальный исследовательский университет ИТМО  
Адрес: 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.  
Студент  
E-mail: testinbox123@mail.ru

**Васильев Кирилл Владимирович**

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева  
Адрес: 302030, Россия, г. Орёл, ул. Московская, д. 77  
Студент  
E-mail: gm.vasiljev485@gmail.com

---

A.Yu. RODICHEV, O.A. IVANOV, I.V. RODICHEVA, A.D. SEREBRENNIKOV, K.V. VASILIEV

## ANALYSIS OF MACHINE LEARNING METHODS IN DIAGNOSTICS AND MAINTENANCE OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

**Abstract.** *The article presents an analysis of machine learning methods in the diagnosis and maintenance of industrial equipment. As a result of the analysis, the concept of "Industry 4.0", the main maintenance strategies, the main methods / models of machine learning were considered, their advantages and disadvantages were considered when predicting possible malfunctions as a result of automating the process and analyzing large amounts of data. A detailed analysis and comparison of machine learning methods made it possible to develop a new concept of a predictive diagnostic system and determine the vector of further research.*

**Keywords:** *methods, machine learning, maintenance; diagnostics; neural networks, algorithms of operation.*

### BIBLIOGRAPHY

1. What are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR? - McKinsey & Company - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir>
2. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.
3. Mayorov S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.
4. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.
5. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a thrust petal gas-dynamic bearing by joint solution of problems of gas dynamics and elasticity theory / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, A.D. Serebrennikov, K.V. Smirnova // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (361) – 2023. P. 72 – 80.
6. Sytin, A.V. Calculation of characteristics of a radial petal gas-dynamic bearing with variable geometry of the supporting surface / A.V. Sytin, S.A. Vlasova, I.A. Serenko, A.D. Serebrennikov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 108 – 116.
7. Rodichev, A.Yu. System for monitoring the condition of components and assemblies of industrial equipment / A.Yu. Rodichev, A.V. Gorin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (362) – 2023. P. 101 – 108.

8. Shutin, D.V. Control of servo valves for the implementation of active lubrication of hydrodynamic bearings / D.V. Shutin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (359) – 2023. P. 137 – 144.
9. Shutin, D.V. Analysis of the accuracy of displacement sensor readings when determining the position of the rotor in fluid friction supports / D.V. Shutin, A.S. Fetisov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3 (353) – 2022. P. 103 – 110.
10. Gorin, A.V. Analysis of control methods and classifications for diagnosing anomalous conditions / A.V. Gorin, R.K. Zaretsky, A.K. Pozdnyakov // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 3(353) – 2022. P.59 – 67.
11. Fetisov, A.S. Experimental analysis of the accuracy of determining the rotor position in fluid friction supports / A.S. Fetisov, D.V. Shutin, M.N. Smetanin, K.K. Nastepanin // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 83 – 91.
12. Rodichev, A.Yu. Study of the possibility of using artificial neural networks for the diagnosis of rotor-support units / A.Yu. Rodichev, R.N. Polyakov, K.V. Vasiliev, E.M. Minaeva // Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 6 (356) – 2022. P. 91 – 96.
13. Theissler, A., Pérez-Velázquez, J., Kettelgerdes, M. and Elger, G., 2021. Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry. Reliability engineering & system safety, 215, p.107864.
14. Chaudhuri, P.R., Rashid, R.B., & Ejaz, W. (2023). Multi-Microcontroller Sensor Data Acquisition to Enhance UAV Attitude Control, Predictive Maintenance, and Healthcare Solutions. 2023 IEEE 14th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), 0771-0777.
15. Fernandes, J., Reis, J., Melão, N.F., Teixeira, L., & Amorim, M. (2021). The Role of Industry 4.0 and BPMN in the Arise of Condition-Based and Predictive Maintenance: A Case Study in the Automotive Industry. Applied Sciences, 11, 3438.
16. Application for invention No. 2023119668 dated 07/25/2023. Intelligent sliding support. Rodichev A. Yu., Ivanov O.A., Rodicheva I.V., Pozdnyakov A.K., Gorin A.V.
17. Application for invention No. 2023128243 dated 10/30/2023. A device for diagnosing rotary systems. Rodichev A. Yu., Ivanov O.A., Rodicheva I.V., Pozdnyakov A.K., Gorin A.V.
18. Certificate of state registration of a computer program 2023665005 Russian Federation. Firmware of a microcontroller for monitoring the condition of sliding bearing assemblies in real time / O.A. Ivanov, A.Yu. Rodichev, A.K. Pozdnyakov, I.V. Rodicheva; applicant and copyright holder of the I.S. Turgenev Federal State Budgetary Educational Institution. - No. 2023663340; application 26.06.2023; publ. 11.07.2023
19. Certificate of state registration of the computer program 2023687914 Russian Federation. Program for receiving, storing and processing data received from IoT sensors of industrial equipment using the MQTT protocol / A.Y. Rodichev, O.A. Ivanov, I.V. Rodicheva, K.V. Vasiliev, D.V. Tolka

**Rodichev Aleksey Yrievich**

Orel State University  
Address: 302020, Russia, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
candidate of technical Sciences, associate professor  
of the department mechatronics, mechanics and robotics  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Ivanov Oleg Anatolievich**

National Research University ITMO  
Address: 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky pr.  
49, lit. A.  
Student  
E-mail: testinbox123@mail.ru

**Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University  
Address: 302020, Russia, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
Postgraduate student  
E-mail: irina.rodicheva.rodicheva@yandex.ru

**Vasiliev Kirill Vladimirovich,**

Orel State University  
Address: 302026, Russia, Orel, Moscovskaya str., 77  
Student  
E-mail: gm.vasiljev485@gmail.com

**Serebrennikov Artem Dmitrievich**

Orel State University  
Address: 302020, Russia, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
E-mail: silver57.93@mail.com

© А.Ю. Родичев, О.А. Иванов, И.В. Родичева, А.Д. Серебряников, К.В. Васильев, 2024

УДК 62-752

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-87-95

А.С. ФЕТИСОВ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ СЖАТИЯ**

**Аннотация.** В статье представлена концептуальная модель демпфера сжатия, использующего магнитоологическую жидкость в качестве рабочего тела. Рассмотрен ряд работ, посвященных магнитоологическим демпферам сжатия, сделаны выводы о применимости магнитоологических

жидкостей для активного контроля уровня вибраций. Рассмотрены основные подходы к построению математических моделей магнитоэологических демпферов, сформулирован комплекс допущений, начальных и граничных условий постановки задачи математического моделирования. Произведен предварительный расчет магнитной цепи демпферов с одной и двумя электромагнитными актуаторами. Представлен эскиз магнитоэологического демпфера сжатия, учитывающий приведенные допущения, предложенные конструктивные особенности и произведенные расчеты параметров магнитной цепи демпфера.

**Ключевые слова:** магнитоэологический демпфер сжатия, уравнение Рейнольдса, концептуальная модель, магнитная цепь, система активного управления.

*Исследование выполнено в рамках выполнения гранта Российского научного фонда № 23-79-01218, <https://rscf.ru/project/23-79-01218>.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koutsoloukas, Lefteris & Nikitas, Nikolaos & Aristidou, Petros. (2022). Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures. *Developments in the Built Environment*. 12. 100094. 10.1016/j.dibe.2022.100094.
2. Jaisee, Sujit & Yue, Feng & Ooi, Yi Hao. (2021). A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*. 235. 112022. 10.1016/j.engstruct.2021.112022.
3. Zhao, J. & Linnett, I. & McLean, L.. (1994). Subharmonic and Quasi-Periodic Motions of an Eccentric Squeeze Film Damper-Mounted Rigid Rotor. *Journal of Vibration and Acoustics*. 116. 10.1115/1.2930436.
4. Ye, Hang & Wang, Yanrong & Jiang, Xianghua. (2017). A Method for the Optimal Design of Split Ring Dampers for Aviation Gears. V010T11A014. 10.1115/DETC2017-67231.
5. Mzythras, Panagiotis & Boulougouris, Evangelos & Theotokatos, Gerasimos. (2021). A novel objective oriented methodology for marine engine–turbocharger matching. *International Journal of Engine Research*. 23. 146808742110397. 10.1177/14680874211039705.
6. Shaik, K., Dutta, B.K. Tuning Criteria of Nonlinear Flexible Rotor Mounted on Squeeze Film Damper Using Analytical Approach. *J. Vib. Eng. Technol.* 9, 325–339 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00229-y>
7. Zhang, Yanjuan & Guo, Jiaxuan & Yang, Jianwei & Li, Xin. (2023). Recent Structural Developments and Applications of Magnetorheological Dampers (MRD): A Review. *Magnetochemistry*. 9. 90. 10.3390/magnetochemistry9040090.
8. Zhang, Xinjie & Wu, Ruochen & Guo, Konghui & Zu, Piyong & Ahmadian, Mehdi. (2019). Dynamic characteristics of magnetorheological fluid squeeze flow considering wall slip and inertia. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 31. 1045389X1988878. 10.1177/1045389X19888781.
9. Meng, Fanxu & Zhou, Jin & Jin, Chaowu & Ji, Wentao. (2019). Modeling and experimental verification of a squeeze mode magnetorheological damper using a novel hysteresis model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 233. 095440621984290. 10.1177/0954406219842906.
10. Forte, Paola & Paternò, M. & Rustighi, Emiliano. (2004). A Magnetorheological Fluid Damper for Rotor Applications. *International Journal of Rotating Machinery*. 10. 10.1155/S1023621X04000181.
11. C Carmignani, P Forte, E Rustighi (2006). Design of a novel magneto-rheological squeeze-film damper. *Smart Mater. Struct.* 15. - 164
12. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr. (2012). Investigation of the vibration reduction of a flexibly supported Jeffcott rotor damped by semiactive elements working on the principle of squeezing thin layers of normal and magnetorheological oils. *Institution of Mechanical Engineers - 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery*. 409-418. 10.1533/9780857094537.6.409.
13. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav. (2012). Investigation of Vibration Mitigation of Flexibly Support Rigid Rotors Equipped with Controlled Elements. *Procedia Engineering*. 48. 135–142. 10.1016/j.proeng.2012.09.496.
14. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav & Kozanek, Jan. (2017). Analysis of the vibration attenuation of rotors supported by magnetorheological squeeze film dampers as a multiphysical finite element problem. *Advances in Engineering Software*. 104. 1-11. 10.1016/j.advengsoft.2016.11.001.
15. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2016). Modelling of magnetorheological squeeze film dampers for vibration suppression of rigid rotors. *International Journal of Mechanical Sciences*. 127. 10.1016/j.ijmecsci.2016.11.009.
16. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Forte, Paola. (2017). A new mathematical model of a short magnetorheological squeeze film damper for rotordynamic applications based on a bilinear oil representation - derivation of the governing equations. *Applied Mathematical Modelling*. 52. 10.1016/j.apm.2017.07.040.
17. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2018). The mathematical model for analysis of attenuation of nonlinear vibration of rigid rotors influenced by electromagnetic effects. *Journal of Sound and Vibration*. 443. 10.1016/j.jsv.2018.11.008.
18. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Forte, Paola. (2014). Analysis of the steady state unbalance response of rigid rotors on magnetorheological dampers: Stability, force transmission and energy dissipation. *International Journal of Applied Mechanics*. 06. 10.1142/S1758825114500227.
19. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2021). Effect of the controllable support elements lubricated by magnetically sensitive fluids on chaotic and regular vibration of flexible rotors during rubbing. *Mechanism and Machine Theory*. 155. 104096. 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104096.
20. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav & Šofer, Michal & Pochylý, František & Fialová, Simona. (2018). Numerical computation of the damping and stiffness coefficients of the classical and magnetorheological squeeze film

damper. MATEC Web of Conferences. 157. 08001. 10.1051/mateconf/201815708001.

21. Šedivý, Dominik & Ferfecki, Petr & Fialová, Simona. (2018). Influence of Eccentricity and Angular Velocity on Force Effects on Rotor of Magnetorheological Damper. EPJ Web of Conferences. 180. 02091. 10.1051/epjconf/201817002091.

22. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Molčan, Michal. (2023). Optimization of Control Parameters of Magnetorheological Squeeze Film Dampers to Minimize the Vibration Amplitude of Rotors Passing the Critical Speed. Applied Sciences. 13. 6905. 10.3390/app13126905.

23. Varnusfaderani, Mahboubeh & Parizi, Mostafa & Hemmatian, Masoud & Ohadi, Abdolreza. (2022). Experimental parameters identification of a flexible rotor system equipped with smart magneto-rheological bearing. Mechatronics. 87. 102880. 10.1016/j.mechatronics.2022.102880.

24. Ghaednia, Hamed & A.R.Ohadi,. (2012). Vibration Behavior of Flexible Rotor System Mounted on MR Squeeze Film Damper With Thermal Growth Effect. Journal of Vibration and Acoustics. 134. 011015. 10.1115/1.4004682.

25. Hemmatian, Masoud & Ohadi, Abdolreza. (2013). Sliding Mode Control of Flexible Rotor Based on Estimated Model of Magnetorheological Squeeze Film Damper. Journal of Vibration and Acoustics. 135. 051023. 10.1115/1.4024609.

26. Irannejad, Mostafa & Ohadi, Abdolreza. (2015). Vibration analysis of a rotor supported on magnetorheological squeeze film damper with short bearing approximation: A contrast between short and long bearing approximations. Journal of Vibration and Control. 23. 10.1177/1077546315601298.

27. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Dynamic performance of a novel integral magnetorheological damper-rotor system. Mechanical Systems and Signal Processing. 172. 109004. 10.1016/j.ymssp.2022.109004.

28. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Nonlinear characteristic investigation of magnetorheological damper-rotor system with local nonlinearity. Chinese Journal of Aeronautics. 36. 10.1016/j.cja.2022.06.001.

29. Савин, Леонид Алексеевич. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин. — Москва: Машиностроение-1, 2006. — 444 с.: ил. — Литература: с. 424-443. — ISBN 5-

30. Singh, Rahul & Tiwari, Mayank & Saksena, Anpeksh & Srivastava, Aman. (2020). Analysis of a Compact Squeeze Film Damper with Magneto Rheological Fluid. Defence Science Journal. 70. 122-130. 10.14429/dsj.70.12788.

31. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: Учеб. Пособие для вузов / И.Е. Иродов. – М.: Высш. Шк., 1983. – 279 с.

32. Новожилов В.В. Установившиеся турбулентные течения несжимаемой жидкости / В.В. Новожилов, В.А. Павловский. – СПб: СПбГУ, 2013. – 483 с.

33. Lord Corporation MRF production. MRF-122EG. - www.lord.com

34. Бондаренко, М.Э. Анализ экспериментальных исследований активной комбинированной опоры ротора / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, М.А. Токмакова, А.Д. Серебренников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева №1(357) – 2023. С.133 – 140.

35. Майоров, С.В. Исследование динамики асимметричного ротора в активных комбинированных опорах / С.В. Майоров, М.Э. Бондаренко, М.А. Токмакова, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева – № 3 (353) 2022 – С. 73-82.

36. Бондаренко, М.Э. Комбинированный подшипниковый узел с изменяемыми жёсткостными и демфирующими характеристиками / М.Э. Бондаренко, Р.Н. Поляков, А.В. Горин, В.А. Позднякова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева №5(355) – 2022. С.51 – 58.

### Фетисов Александр Сергеевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл

Ассистент кафедры мехатроники, механики и робототехники

E-mail: fetisov57rus@mail.ru

---

A.S. FETISOV

## STUDY OF MAGNETORHEOLOGICAL SQUEEZE DAMPERS

**Abstract.** *The article presents a conceptual model of a squeeze damper using a magnetorheological fluid as an operating fluid. Articles devoted to magnetorheological squeeze dampers are reviewed, and conclusions are drawn about the applicability of magnetorheological fluids for active control of vibrations. The main approaches to constructing of mathematical models of magnetorheological dampers are considered. A set of assumptions, initial and boundary conditions for the problem of mathematical modeling are formulated. A preliminary calculation of the magnetic circuit of dampers with one and two electromagnetic actuators has been made. A sketch of a magnetorheological squeeze damper is presented, taking into account the above assumptions, proposed design features and calculations of the parameters of the damper magnetic circuit.*

**Keywords:** *magnetorheological squeeze damper; Reynolds equation, conceptual model, magnetic circuit, active control system*

## BIBLIOGRAPHY

1. Koutsoloukas, Lefteris & Nikitas, Nikolaos & Aristidou, Petros. (2022). Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review with associated applications on building-like structures. *Developments in the Built Environment*. 12. 100094. 10.1016/j.dibe.2022.100094.
2. Jaisee, Sujit & Yue, Feng & Ooi, Yi Hao. (2021). A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*. 235. 112022. 10.1016/j.engstruct.2021.112022.
3. Zhao, J. & Linnett, I. & McLean, L.. (1994). Subharmonic and Quasi-Periodic Motions of an Eccentric Squeeze Film Damper-Mounted Rigid Rotor. *Journal of Vibration and Acoustics*. 116. 10.1115/1.2930436.
4. Ye, Hang & Wang, Yanrong & Jiang, Xianghua. (2017). A Method for the Optimal Design of Split Ring Dampers for Aviation Gears. V010T11A014. 10.1115/DETC2017-67231.
5. Mizythras, Panagiotis & Boulougouris, Evangelos & Theotokatos, Gerasimos. (2021). A novel objective oriented methodology for marine engine–turbocharger matching. *International Journal of Engine Research*. 23. 146808742110397. 10.1177/14680874211039705.
6. Shaik, K., Dutta, B.K. Tuning Criteria of Nonlinear Flexible Rotor Mounted on Squeeze Film Damper Using Analytical Approach. *J. Vib. Eng. Technol.* 9, 325–339 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00229-y>
7. Zhang, Yanjuan & Guo, Jiaxuan & Yang, Jianwei & Li, Xin. (2023). Recent Structural Developments and Applications of Magnetorheological Dampers (MRD): A Review. *Magnetochemistry*. 9. 90. 10.3390/magnetochemistry9040090.
8. Zhang, Xinjie & Wu, Ruochen & Guo, Konghui & Zu, Piyong & Ahmadian, Mehdi. (2019). Dynamic characteristics of magnetorheological fluid squeeze flow considering wall slip and inertia. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 31. 1045389X1988878. 10.1177/1045389X19888781.
9. Meng, Fanxu & Zhou, Jin & Jin, Chaowu & Ji, Wentao. (2019). Modeling and experimental verification of a squeeze mode magnetorheological damper using a novel hysteresis model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 233. 095440621984290. 10.1177/0954406219842906.
10. Forte, Paola & Paternò, M. & Rustighi, Emiliano. (2004). A Magnetorheological Fluid Damper for Rotor Applications. *International Journal of Rotating Machinery*. 10. 10.1155/S1023621X04000181.
11. C Carmignani, P Forte, E Rustighi (2006). Design of a novel magneto-rheological squeeze-film damper. *Smart Mater. Struct.* 15 164
12. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr. (2012). Investigation of the vibration reduction of a flexibly supported Jeffcott rotor damped by semiactive elements working on the principle of squeezing thin layers of normal and magnetorheological oils. *Institution of Mechanical Engineers - 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery*. 409-418. 10.1533/9780857094537.6.409.
13. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav. (2012). Investigation of Vibration Mitigation of Flexibly Support Rigid Rotors Equipped with Controlled Elements. *Procedia Engineering*. 48. 135–142. 10.1016/j.proeng.2012.09.496.
14. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav & Kozanek, Jan. (2017). Analysis of the vibration attenuation of rotors supported by magnetorheological squeeze film dampers as a multiphysical finite element problem. *Advances in Engineering Software*. 104. 1-11. 10.1016/j.advensoft.2016.11.001.
15. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2016). Modelling of magnetorheological squeeze film dampers for vibration suppression of rigid rotors. *International Journal of Mechanical Sciences*. 127. 10.1016/j.ijmecsci.2016.11.009.
16. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Forte, Paola. (2017). A new mathematical model of a short magnetorheological squeeze film damper for rotordynamic applications based on a bilinear oil representation - derivation of the governing equations. *Applied Mathematical Modelling*. 52. 10.1016/j.apm.2017.07.040.
17. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2018). The mathematical model for analysis of attenuation of nonlinear vibration of rigid rotors influenced by electromagnetic effects. *Journal of Sound and Vibration*. 443. 10.1016/j.jsv.2018.11.008.
18. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Forte, Paola. (2014). Analysis of the steady state unbalance response of rigid rotors on magnetorheological dampers: Stability, force transmission and energy dissipation. *International Journal of Applied Mechanics*. 06. 10.1142/S1758825114500227.
19. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Kozanek, Jan. (2021). Effect of the controllable support elements lubricated by magnetically sensitive fluids on chaotic and regular vibration of flexible rotors during rubbing. *Mechanism and Machine Theory*. 155. 104096. 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104096.
20. Ferfecki, Petr & Zapomel, Jaroslav & Šofer, Michal & Pochylý, František & Fialová, Simona. (2018). Numerical computation of the damping and stiffness coefficients of the classical and magnetorheological squeeze film damper. *MATEC Web of Conferences*. 157. 08001. 10.1051/mateconf/201815708001.
21. Šedivý, Dominik & Ferfecki, Petr & Fialová, Simona. (2018). Influence of Eccentricity and Angular Velocity on Force Effects on Rotor of Magnetorheological Damper. *EPJ Web of Conferences*. 180. 02091. 10.1051/epjconf/201817002091.
22. Zapomel, Jaroslav & Ferfecki, Petr & Molčan, Michal. (2023). Optimization of Control Parameters of Magnetorheological Squeeze Film Dampers to Minimize the Vibration Amplitude of Rotors Passing the Critical Speed. *Applied Sciences*. 13. 6905. 10.3390/app13126905.
23. Varnusfaderani, Mahboubeh & Parizi, Mostafa & Hemmatian, Masoud & Ohadi, Abdolreza. (2022). Experimental parameters identification of a flexible rotor system equipped with smart magneto-rheological bearing. *Mechatronics*. 87. 102880. 10.1016/j.mechatronics.2022.102880.
24. Ghaednia, Hamed & A.R.Ohadi,. (2012). Vibration Behavior of Flexible Rotor System Mounted on MR Squeeze Film Damper With Thermal Growth Effect. *Journal of Vibration and Acoustics*. 134. 011015. 10.1115/1.4004682.
25. Hemmatian, Masoud & Ohadi, Abdolreza. (2013). Sliding Mode Control of Flexible Rotor Based on Estimated Model of Magnetorheological Squeeze Film Damper. *Journal of Vibration and Acoustics*. 135. 051023. 10.1115/1.4024609.



26. Irannejad, Mostafa & Ohadi, Abdolreza. (2015). Vibration analysis of a rotor supported on magnetorheological squeeze film damper with short bearing approximation: A contrast between short and long bearing approximations. *Journal of Vibration and Control*. 23. 10.1177/1077546315601298.
27. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Dynamic performance of a novel integral magnetorheological damper-rotor system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 172. 109004. 10.1016/j.ymssp.2022.109004.
28. Wang, Jun & Liu, Yunfei & Qin, Zhaoye & Ma, Liang & Chu, Fulei. (2022). Nonlinear characteristic investigation of magnetorheological damper-rotor system with local nonlinearity. *Chinese Journal of Aeronautics*. 36. 10.1016/j.cja.2022.06.001.
29. Savin Leonid Alekseyevich. Modeling of rotor systems with fluid film bearings / L. A. Savin, O. V. Solomin./ L. A. Savin, O. V. Solomin. – Moskva: Mashinostroyeniye-1, 2006. – 444 s.: il. — Literatura: p. 424-443. - ISBN 5-94275-258-3.
30. Singh, Rahul & Tiwari, Mayank & Saksena, Anpeksh & Srivastava, Aman. (2020). Analysis of a Compact Squeeze Film Damper with Magneto Rheological Fluid. *Defence Science Journal*. 70. 122-130. 10.14429/dsj.70.12788.
31. Irodov I.Ye. Basic laws of electromagnetism: Textbook. Textbook for universities/ I.Ye. Irodov. – M.: Vyssheye. Shk., 1983. – 279 p.
32. Novozhilov V.V. Steady turbulent flows of incompressible fluid/ V.V. Novozhilov, V.A. Pavlovskiy. – SPb: SPbGU, 2013. – 483 s.
33. Lord Corporation MRF production. MRF-122EG. - www.lord.com
34. Bondarenko, M.E. Analysis of experimental studies of active combined rotor support / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, M.A. Tokmakova, A.D. Serebrennikov // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 1 (357) – 2023. P. 133 – 140.*
35. Mayorov, S.V. Study of the dynamics of an asymmetric rotor in active combined supports / S.V. Mayorov, M.E. Bondarenko, M.A. Tokmakova, V.A. Pozdnyakova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology. – Orel: OSU named after I.S. Turgenev – No. 3 (353) 2022 – P. 73-82.*
36. Bondarenko, M.E. Combined bearing unit with variable rigidity and damping characteristics / M.E. Bondarenko, R.N. Polyakov, A.V. Gorin, V.A. Pozdnyakova // *Fundamental and applied problems of engineering and technology Orel: OSU named after I.S. Turgenev No. 5 (355) – 2022. P. 51 – 58.*

**Fetisov Alexander Sergeevich**

Orel State University,

Assistant of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics

E-mail: fetisov57rus@mail.ru

© А.С. Фетисов, 2024

УДК 629.4.021.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-96-104

**В.И. ВОРОБЬЕВ, С.Н. ЗЛОБИН, О.В. ИЗМЕРОВ**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШАРНИРОВ НА ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ**

***Аннотация.** Рассмотрена возможность применения сферических резинометаллических шарниров в узлах экипажной части высокоскоростного подвижного состава. Предложены варианты конструкции двухслойного сферического резинометаллического шарнира.*

***Ключевые слова:** резинометаллический шарнир, радиальная жесткость, несущая способность, равноупругость.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Потураев, В.Н. Резиновые и резинометаллические детали машин / В.Н. Потураев. – М.: Машиностроение, 1966. – 299 с.
2. Модернизация колесно-моторного блока электровоза 2ЭС6 / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.И. Борзенков, С.Н. Злобин, С.О. Копылов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018. – № 4-1 (330). – С. 131-139.*
3. Тяговый привод локомотивов с высокомоментным коллекторным тяговым электродвигателем / О.В. Дорофеев, В.И. Воробьев, М.И. Борзенков, О.В. Измеров, С.Н. Злобин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ им. Тургенева, 2021. – № 2 (346). – С. 118-129.*
4. Синхронные тяговые электродвигатели в приводах перспективных локомотивов / А.С. Космодамианский, С.Н. Злобин, О.В. Измеров // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ им. Тургенева, 2023. – № 2 (358). – С. 124-137.*

5. Исследования по созданию подвески тягового электродвигателя со сферическими резинометаллическими шарнирами для тепловозов с опорно-осевым приводом. Заключительный отчет / Отчет ВНИТИ И-17-85. – Коломна, 1985. – 55 с.
6. Результаты стендовых испытаний подвесок редуктора тягового привода тепловоза 2ТЭ121. Заключительный отчет / Отчет ВНИТИ И-101-87. – Коломна, 1987. – 68 с.
7. Потураев, В.Н. Резиновые детали машин / В.Н. Потураев, В.И. Дырда. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
8. Гуммированные детали машин / Н.С. Пенкин, В.Г. Копченков, В.М. Сербин, А.Н. Пенкин. – М.: Машиностроение, 2013. – 245 с.
9. Алексеева, М.С. Анализ работы тепловозов серии 2ТЭ25А «Витязь» на Дальневосточной железной дороге / М.С. Алексеева // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. LVIII междунар. науч.-практ. конф. – № 5(53). Часть II. – Новосибирск: СибАК, 2016. – С. 61-66.
10. Соколов, Ю.Н. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 / Ю.Н. Соколов, А.С. Пономарев, В.Е. Дегтярев // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 4-11.
11. Ахмадеев, С.Б. Анализ повреждений механической части электровозов нового поколения в эксплуатации (на примере 2ЭС6) / С.Б. Ахмадеев, А.М. Корнев // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава. – Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – Ч. 1. – С. 203-208.
12. Коростелев, С.А. Долговечность и оптимальное проектирование гусеничного движителя с резинометаллическими элементами: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.С. Коростелев. – Барнаул: АлтГТУ, 2017. – 358 с.
13. Сохань, О.Н. Конструирование втулок несущих винтов вертолетов // О.Н. Сохань. – М.: Московский ордена Ленина и ордена Октябрьской революции авиационный институт, 1981. – 55 с.
14. Двухслойные сферические резинометаллические шарниры и проблемы расчета их характеристик / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, Д.Н. Шевченко, Д.Ю. Расин // Вестник ВНИИЖТ, 2022. – Т. 81. – № 2. – С. 114-124.
15. Способ сборки сферического резинометаллического шарнира. А.С. СССР №14903807 / В.С. Коссов, А.И. Кокорев, В.А. Лысак, В.А. Пузанов, В.С. Авраменко, О.В. Измеров. Опубл. 15.07.89, бюл. № 26.
16. Теоретические основы инжиниринговых технологий изобретательского творчества, как проектно-аналитических систем / О.В. Измеров, М.И. Борзенков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: Госуниверситет - УНПК, 2012. – № 6-2 (296). – С. 65-69.
17. Патент 202196 Российская Федерация, МПК F16C 11/06 (2006.01). Сферический резинометаллический шарнир. – № 2020121555; заявл. 29.06.2020; опубл. 05.02.2021 / Воробьев В.И. [и др.].
18. Вопросы создания равнопрочных двухслойных сферических резинометаллических шарниров / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, О.В. Измеров, Д.Ю. Расин, Д.Н. Шевченко // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21. – № 1 (104). – С. 22-30.

**Воробьев Владимир Иванович**  
Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Подвижной  
состав железных дорог»  
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

**Злобин Сергей Николаевич**  
Орловский государственный  
университет имени  
И.С. Тургенева, г. Орёл  
Кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры  
машиностроения  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Измеров Олег Васильевич**  
Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Соискатель по кафедре  
«Подвижной состав железных  
дорог»  
E-mail: izmerov@yandex.ru

---

V.I. VOROBYEV, S.N. ZLOBIN, O.V. IZMEROV

## USING DOUBLE-LAYER RUBBER-METAL HINGES ON HIGH SPEED ROLLING STOCK

**Abstract.** *The possibility of using spherical rubber-metal hinges in the undercarriage units of high-speed rolling stock is considered. Variants of the design of a two-layer spherical rubber-metal hinge are proposed.*

**Key words:** *rubber-metal hinge, radial stiffness, load-bearing capacity, equal elasticity.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Poturaev, V.N. Rezinovye i rezinometallicheskie detali mashin / V.N. Poturaev. – М.: Mashinostroenie, 1966. – 299 s.
2. Modernizaciya kolesno-motornogo bloka elektrovoza 2ES6 / V.I. Vorobev, O.V. Izmerov, M.I. Borzenkov, S.N. Zlobin, S.O. Kopylov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2018. – № 4-1 (330). – С. 131-139.
3. Tyagovyy privod lokomotivov s vysokomomentnym kollektornym tyagovym elektrodvigatelem / O.V. Dorofeev, V.I. Vorobev, M.I. Borzenkov, O.V. Izmerov, S.N. Zlobin // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. Turgeneva, 2021. – № 2 (346). – С. 118-129.

4. Sinhronnye tyagovye elektrodvigateli v privodah perspektivnyh lokomotivov / A.S. Kosmodamianskij, S.N. Zlobin, O.V. Izmerov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. Turgeneva, 2023. – № 2 (358). – S. 124-137.
5. Issledovaniya po sozdaniyu podveski tyagovogo elektrodvigatelya so sfericheskimi rezinometallicheskimisharnirami dlya teplovozov s oporno-osevym privodom. Zaklyuchitelnyj otchet / Otchet VNITI I-17-85. – Kolomna, 1985. – 55 s.
6. Rezultaty stendovyh ispytaniy podvesok reduktora tyagovogo privoda teplovoza 2TE121. Zaklyuchitelnyj otchet / Otchet VNITI I-101-87. – Kolomna, 1987. – 68 s.
7. Poturaev, V.N. Rezinovye detali mashin / V.N. Poturaev, V.I. Dyrda. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 216 s.
8. Gummirovannye detali mashin / N.S. Penkin, V.G. Kopchenkov, V.M. Serbin, A.N. Penkin. – M.: Mashinostroenie, 2013. – 245 s.
9. Alekseeva, M.S. Analiz raboty teplovozov serii 2TE25A «Vityaz» na Dalnevostochnoj zheleznoj doroge / M.S. Alekseeva // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sb. st. po mater. LVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – № 5(53). CHast II. – Novosibirsk: SibAK, 2016. – S. 61-66.
10. Sokolov, YU.N. Povysenie nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskih elektrovozov EP1M i EP10 / YU.N. Sokolov, A.S. Ponomarev, V.E. Degtyarev // Lokomotiv-inform. – 2010. – № 6. – S. 4-11.
11. Ahmadeev, S.B. Analiz povrezhdenij mekhanicheskoy chasti elektrovozov novogo pokoleniya v ekspluatatsii (na primere 2ES6) / S.B. Ahmadeev, A.M. Kornev // Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povysenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. – Omskij gos. un-t putej soobshcheniya, 2015. – CH. 1. – S. 203-208.
12. Korostelev, S.A. Dolgovechnost i optimalnoe proektirovanie gusenichnogo dvizhitelya s rezinometallicheskimielementami: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / A.S. Korostelev. – Barnaul: AltGTU, 2017. – 358 s.
13. Sohan, O.N. Konstruirovaniye vtulok nesushchih vintov vertoletov // O.N. Sohan. – M.: Moskovskij ordena Lenina i ordena Oktyabrskoj revolyucii aviacionnyj institut, 1981. – 55 s.
14. Dvuhslojnye sfericheskie rezinometallicheskie sharniry i problemy rascheta ih harakteristik / A.S. Kosmodamianskij, V.I. Vorobev, O.V. Izmerov, D.N. Shevchenko, D.YU. Rasin // Vestnik VNIIZHT, 2022. – T. 81. – № 2. – S. 114-124.
15. Sposob sborki sfericheskogo rezinometallicheskogo sharnira. A.S. SSSR №14903807 / V.S. Kossov, A.I. Kokorev, V.A. Lysak, V.A. Puzanov, V.S. Avramenko, O.V. Izmerov. Opubl. 15.07.89, bjul. № 26.
16. Teoreticheskie osnovy inzhiniringovyh tekhnologij izobretatelskogo tvorchestva, kak proektno-analiticheskikh sistem / O.V. Izmerov, M.I. Borzenkov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: Gosuniversitet - UNPK, 2012. – № 6-2 (296). – S. 65-69.
17. Patent 202196 Rossijskaya Federaciya, MPK F16C 11/06 (2006.01). Sfericheskij rezinometallicheskij sharnir. – № 2020121555; zayavl. 29.06.2020; opubl. 05.02.2021 / Vorobev V.I. [i dr.].
18. Voprosy sozdaniya ravnoprochnyh dvuhslojnyh sfericheskikh rezinometallicheskih sharnirov / A.S. Kosmodamianskij, V.I. Vorobev, O.V. Izmerov, D.YU. Rasin, D.N. Shevchenko // Mir transporta. – 2023. – T. 21. – № 1 (104). – S. 22-30.

**Vorobyev Vladimir Ivanovich**  
Bryansk State Technical University,  
Bryansk  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor at the  
Department of «Railroad rolling  
stock»  
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

**Zlobin Sergey Nikolaevich**  
Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor at the  
Department of «Mechanical  
engineering»  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Izmerov Oleg Vasilevich**  
Bryansk State Technical University,  
Bryansk  
Competitor of the Department  
«Railroad rolling stock»  
E-mail: izmerov@yandex.ru

© В.И. Воробьев, С.Н. Злобин, О.В. Измеров, 2024

## **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 004.032.22

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-105-109

В.А. ГАСАНОВА, А.В. ПУШКАРЕВА

### **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СЖАТИЯ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЭКГ АРИТМИИ В ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ**

**Аннотация.** *Возможность контролировать определенные показатели состояния здоровья пациента, не выходя из дома, становится все более популярным вариантом использования телемедицинских технологий. Дистанционный мониторинг пациентов позволяет поставщикам медицинских услуг управлять острыми и хроническими состояниями пациента. В связи с высокой смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний, телемониторинг является простым и доступным инструментом анализа электрокардиографии (ЭКГ) в догоспитальных условиях. В работе рассматривается проблема сжатия и передачи данных ЭКГ на расстоянии. Обозначена задача внедрения в приложения мобильных телефонов для регистрации электрокардиосигналов*

безопасных алгоритмов сжатия и передачи данных по внутреннему, защищенному каналу с дальнейшей персонализированной постановкой диагноза. Методы. Проанализированы существующие методы сжатия и передачи информации с помощью телемедицины. Для улучшения качества передачи информации и, соответственно, достоверности постановки диагноза на расстоянии, необходимо разработать алгоритм сжатия и передачи данных ЭКГ с помощью телемедицинских технологий. Результаты. Предложен алгоритм сжатия и передачи данных ЭКГ аритмии с помощью телемедицинских технологий для приложений в сотовых телефонах по регистрации ЭКГ. Данный алгоритм позволит не только эффективно сжать и передать данные по безопасному каналу связи, но и классифицирует вид аритмии, для быстрой постановки диагноза данным в электронной карте пациента. Выводы. Для построения алгоритма требуется использовать систему передачи данных по протоколу TCP/IP. При классификации аритмии нужно учитывать все возможные отклонения не только по амплитуде, но и по временному диапазону показателей ЭКГ, а также персональные данные пациента, находящиеся в электронной карте лечебно-профилактического учреждения.

**Ключевые слова:** телемедицина, телемедицинские системы и технологии, алгоритм, электрокардиограмма, телемониторинг, сжатие и передача данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмаил, Ю. П., Азми Ш. Эффективный алгоритм сжатия и передачи данных ЭКГ для телемедицины // Ю. П. Исмаил // Теоретические и прикладные информационные технологии. - 2019. - № 4 – С. 1060-1070.
2. Чо Ги, Ли С.Дж., Ли Т.Р. Оптимизированный алгоритм сжатия для передачи данных ЭКГ в реальном времени в беспроводной сети медицинских информационных систем. J Med Syst. 2015 Jan;39(1): 161. doi: 10.1007/s10916-014-0161-7. Epub 2014 4 декабря. PMID: 25472726.
3. Хомяков А.В. Современные подходы к проектированию телемедицинских систем для исследования ЭКГ // МНИЖ. 2021. №6-1 (108). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-proektirovaniyu-telemeditsinskih-sistem-dlya-issledovaniya-ekg> (дата обращения: 09.12.2023).
4. Гельман В. Я., Дохов М. А. Проблемы развития домашнего мониторинга состояния здоровья // Медицина 2020; 8(2): 50-60.
5. Мустафа Альмахди Алгает, Абд Самад Хасан Басари, Бин Хасан Басари, Али Ахмад Милад, Салем Адруги, Салем Мустафа Алдип. Сжатие и передача медицинских данных в шумных сетях WLAN: обзор // Международный журнал Grid и распределенных вычислений. 2019. DOI: 10.33832/ijgdc.2019.12.2.01.
6. Мохаммед Абу-Заххад. Сжатие сигнала ЭКГ с использованием дискретного вейвлет-преобразования. В книге: Дискретные вейвлет-преобразования - теория и приложения [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/221911655\\_ECG\\_Signal\\_Compression\\_Using\\_Discrete\\_Wavelet\\_Transform](https://www.researchgate.net/publication/221911655_ECG_Signal_Compression_Using_Discrete_Wavelet_Transform) (дата обращения 01.11.2023 года).
7. A. Z. M. et al., State-of-Art Methods and Future Perspectives for Personal Recognition Based on EEG Signals IET Biometrics. – 2015. –Vol. 4 – p.p. 179–90.
8. J. Dau. Et al., Near-lossless multichannel EEG compression based on matrix and tensor decompositions, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Vol. 17. – 2013. - № 3, p.p. 708–714.
9. P. Kh. and A. T., A survey on different noise removal techniques of EEG signal, IJARCCSE. – 2013. – Vol. 2, Issue 2, Feb.
10. Abdulbaqi A.S., "Biometric Identification Using An Electroencephalogram Signals Compression Based on KC Function", The 6th International Scientific Conference of The Union of Arab Statisticians, Jordan. - 2018.

**Гасанова Вероника Алексеевна**  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
технологический университет», г. Пенза  
Аспирант кафедры «Пищевые производства»  
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина,  
1а/11  
E-mail: veronicka6949@yandex.ru

**Пушкарева Анастасия Валерьевна**  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
технологический университет», г. Пенза К.т.н.,  
доцент, доцент кафедры «Биомедицинская  
инженерия»  
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина,  
1а/11  
E-mail: a.v.push89@gmail.com

---

V.A. HASANOVA, A.V. PUSHKAREVA

## DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR COMPRESSION AND TRANSMISSION OF ECG ARRHYTHMIA DATA IN TELEMEDICINE SYSTEMS

**Abstract.** The ability to monitor certain indicators of a patients health status without leaving home is becoming an increasingly popular option for using telemedicine technologies. Remote patient monitoring allows healthcare providers to manage acute and chronic patient conditions. Due to the high mortality from cardiovascular diseases, telemonitoring is a simple and affordable tool for analyzing electrocardiography (ECG) in prehospital conditions. The paper considers the problem of compression and transmission of ECG data over distances. The task of introducing secure compression algorithms and data transmission over an internal, secure channel with further personalized diagnosis into mobile phone applications for recording electrocardiosignals is outlined. Methods. The existing methods of information compression and transmission using telemedicine are analyzed. To improve the quality of information transmission and, accordingly, the reliability of diagnosis at a distance, it is necessary to develop an algorithm for compressing and transmitting ECG data using telemedicine technologies. Results. An algorithm for compression and transmission of ECG

*arrhythmia data using telemedicine technologies for applications in cell phones for ECG registration is proposed. This algorithm will not only effectively compress and transmit data over a secure communication channel, but also classifies the type of arrhythmia, for a quick diagnosis of the data in the electronic patient card. Conclusions. To build the algorithm, it is required to use a data transmission system over the TCP/IP protocol. When classifying arrhythmias, it is necessary to take into account all possible deviations not only in amplitude, but also in the time range of ECG indicators, as well as the patients personal data in the electronic card of the medical preventive institution.*

**Keywords:** telemedicine, telemedicine systems and technologies, algorithm, electrocardiogram, telemonitoring, data compression and transmission.

## BIBLIOGRAPHY

1. Ismail, Yu. P., Azmi Sh. An effective algorithm for compression and transmission of ECG data for telemedicine / Yu. P. Ismail // Theoretical and applied information technologies. - 2019. - No. 4 – pp. 1060-1070.
2. Cho GY, Lee SJ, Lee TR. An optimized compression algorithm for real-time ECG data transmission in wireless network of medical information systems. J Med Syst. 2015 Jan;39(1):161. doi: 10.1007/s10916-014-0161-7. Epub 2014 Dec 4. PMID: 25472726.
3. Khomyakov A.V. Modern approaches to the design of telemedicine systems for ECG research // MNIZH. 2021. No.6-1 (108). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-podhody-k-proektirovaniyu-telemeditsinskih-sistem-dlya-issledovaniya-ekg> (date of application: 09.12.2023).
4. Gelman V. Ya., Dokhov M. A. Problems of development of home health monitoring // Medicine 2020; 8(2): 50-60.
5. Mustafa Almahdi Algay, Abd Samad Hassan Basari, Bin Hassan Basari, Ali Ahmad Milad, Salem Adrugi, Salem Mustafa Aldip. Compression and transmission of medical data in noisy WLAN networks: overview// International Journal of Grid and Distributed Computing. 2019. DOI: 10.33832/ijgdc.2019.12.2.01.
6. Mohammed Abu-Zahhad. Compression of the ECG signal using discrete wavelet transform. In the book: Discrete wavelet transformations - theory and applications [Electronic resource] Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/221911655\\_ECG\\_Signal\\_Compression\\_Using\\_Discrete\\_Wavelet\\_Transform](https://www.researchgate.net/publication/221911655_ECG_Signal_Compression_Using_Discrete_Wavelet_Transform) (accessed 01.11.2023).
7. A. Z. M. et al., State-of-Art Methods and Future Perspectives for Personal Recognition Based on EEG Signals IET Biometrics. – 2015. –Vol. 4 – p.p. 179–90.
8. J. Dau. Et al., Near-lossless multichannel EEG compression based on matrix and tensor decompositions, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Vol. 17. – 2013. - № 3, p.p. 708–714.
9. P. Kh. and A. T., A survey on different noise removal techniques of EEG signal, IJARCCE. – 2013. – Vol. 2, Issue 2, Feb.
10. Abdulbaqi A.S., "Biometric Identification Using An Electroencephalogram Signals Compression Based on KC Function", The 6th International Scientific Conference of The Union of Arab Statisticians, Jordan. - 2018.

**Gasanova Veronika Alekseevna**  
Penza State Technological University, Penza  
Postgraduate student of the department "Food  
production"  
440039, Penza, Baydukova passage/ul. Gagarina, 1a/11  
E-mail: veronicka6949@yandex.ru

**Pushkareva Anastasia Valeryevna Penza**  
State Technological University, Penza  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Biomedical  
Engineering  
440039, Penza, Baydukova passage/ul. Gagarina, 1a/11  
E-mail: a.v.push89@gmail.com

© В.А. Гасанова, А.В. Пушкарева, 2024

УДК 621.3

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-110-114

А.Н. КРУГОВОЙ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСТРОЙСТВАХ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ

**Аннотация.** При проведении мероприятий по сердечно-легочной реанимации для обеспечения деформации грудной клетки человека прикладывают усилия заданной частоты, для создания которых применяют электрические приводы. Известны примеры использования бесколлекторных двигателей постоянного тока с редуктором в качестве привода таких устройств, однако стоимость таких приводов достаточно высока. Для снижения стоимости привода автором исследована возможность применения традиционных коллекторных двигателей постоянного тока без редуктора. Разработаны математические модели, подтверждающие возможность такого использования и позволяющие определить оптимальные параметры системы. Привод постоянного тока позволяет регулировать величину деформации грудной клетки за счет изменения напряжения, прикладываемого к якорной цепи.

**Ключевые слова.** Двигатель постоянного тока, циклические усилия, сердечно-легочная реанимация.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сердечно-легочная реанимация. Рекомендации Европейского совета по реанимации и Американской ассоциации сердца. - <https://medprosvita.com.ua/serdechno-legochnaya-reanimaciya-rekome/>.
2. Кузнецова О.Ю., Лебединский К.М., Дубикайтис Т.А. Сердечно-легочная и расширенная реанимация. – СПб: Издательство СПбМАПО, 2005. – 176 с.
3. Круговой А.Н. Исследование процессов деформации грудной клетки при сердечно-легочной реанимации. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 6 (356). С. 187-191.
4. Автоматическое устройство для наружного массажа сердца при сердечно-легочной реанимации. Патент на полезную модель 204656 U1, 03.06.2021.

### **Круговой Александр Николаевич**

Севастопольский государственный университет, Севастополь,

Кандидат технических наук, Доцент

299058 Севастополь, Ул. Героев Бреста 25 кв. 135

М.т. (+7978) 028 72 43

E-MAIL: atpp\_krugovoi@mail.ru

---

A.N. KRUGOVOY

## THE USE OF DC MOTORS IN CARDIOPULMONARY RESUSCITATION DEVICES

**Abstract.** *When carrying out measures for cardiopulmonary resuscitation, efforts of a given frequency are applied to ensure deformation of the human chest, for the creation of which electric drives are used. There are known examples of using brushless DC motors with a gearbox as a drive for such devices, but the cost of such drives is quite high. To reduce the cost of the drive, the author investigated the possibility of using traditional DC collector motors without a gearbox. Mathematical models have been developed to confirm the possibility of such use. The DC drive allows you to adjust the amount of deformation of the chest by changing the voltage applied to the anchor chain.*

**Keywords:** *DC motor, cyclic efforts, cardiopulmonary resuscitation.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Serdechno-legochnaya reanimaciya. Rekomendacii Evropejskogo soveta po reanimaciii Amerikanskoj asociaciiiserdca.- <https://medprosvita.com.ua/serdechno-legochnaya-reanimaciya-rekome/>.
2. Kuznecova O. YU., Lebedinskij K.M., Dubikajtis T.A. Serdechno-legochnaya i rasshirennaya reanimaciya. – SPb: Izdatelstvo SPbMAPO, 2005. – 176 s.
3. Krugovoy A.N. Issledovanie protsessov deformacii grudnoy kletki pri serdechno-legochnaoy reanimaciyi – Fundamentalnii i prikladnii problemi tehniki i tehnologii. 2022. № 6 (356). С. 187-191.
4. Avtomaticheskoe ustroystvo dlay naruzhnogo massazha serdtza pri serdechno-legochnoi reanimaytzii. Patent na poleznuoy model 204656 U1, 03.06.2021.

### **Krugovoy Alexander Nikolaevich**

Sevastopol State University, Sevastopol,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

299058 Sevastopol, Heroes of Brest str. 25 sq.135

Ph. (+7978) 028 72 43

E-MAIL: atpp\_krugovoi@mail.ru

© А.Н. Круговой, 2024

УДК 629.7.023

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-115-121

Я.Н. ГАЙНУЛЛИНА, М.И. КАЛИНИН, П.К. СОПИН

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ АППАРАТОВ ЖИДКОСТНОГО ДЫХАНИЯ

**Аннотация.** Разработанные и изготовленные варианты моделей аппарата жидкостного дыхания замкнутого цикла после серии лабораторных исследований в условиях нормобарии и гипербарии проходят стадию усовершенствования компоновки и модернизацию систем и узлов элементов, отвечающих всем техническим требованиям к рабочим условиям эксплуатации с участием биологических объектов. Особенности проектирования и изготовления инновационных сферических оболочек для глубоководных исследований посвящена эта работа.

**Ключевые слова:** сферические оболочки, глубоководное оборудование, биообъекты, жидкостное дыхание.

*Работа выполнена при поддержке программы Приоритет-2030 ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (стратегический проект №2 "Прорывные исследования и разработки в области жидкостного дыхания").*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kylstra J.A. Of mice as fish / J.A. Kylstra, M.O. Tissing, //A. Trans. Of American Society for Artificial Internal Organs, 1962. – № 1. – P. 378 – 383.
2. Kandler M.A. Persistent Improvement of Gas Exchange and Lung Mechanics by Aerosolized Hardt, E. Schoof, Perfluorocarbon / M.A. Kandler, K. von Rascher // American der J. Dotsch, W. Journal of respiratory and Critical Care Medicine, 2001. – № 1. – P. 31 – 35.
3. Мороз В.В. Жидкостная вентиляция лёгких, её возможности и перспективы (современное состояние вопроса) / В.В. Мороз, А.В. Власенко, И.О. Закс // Анестезиология и реанимация, 2001. – №6. – С. 66-73.
4. Попцов В.Н. Первый клинический опыт использования частичной жидкостной вентиляции на основе эндобронхиального введения перфторана в комплексной терапии респираторного дистресс – синдрома / В.Н. Попцов, А.Е. Баландюк // Биомедицинский журнал, 2004. – Т.5 – С. 173 - 174.
5. Lamaire F. Low – dose perfluorocarbon: a revival for partial liquid ventilation // Critical Care Vedicine. 2007. – № 2. – P. 662-663.
6. Corno C. Volume controlled apparatus for neonatal tidal liquid ventilation / C. Corno, G.B. Fiore, E. Martelli, C. Dani, M.L. Costantino // ASAIO Journal, 2003. – № 3. – P. 250 - 258.
7. Degrauwe P.L. Effect of perfluorochemical liquid ventilation cardiac output and blood pressure variability in neonatal piglets with respiratory insufficiency / P.L. Degrauwe, G.D.Vos, G.G. Geskens, J.M. Geilen, C.E. Blanco // Pediatr Pulmonol. 2000. – Vol. 30. – P. 114-124.
8. Larrabe J.L. Development of a time – cycled volume – controlled pressure – limited respirator and lung mechanics system for total liquid ventilation / J.L. Larrabe, F.J. Alvares, E.G. Cuesta, A. Valls – I – Soles, L.F. Alfonso, A. Arnaiz, M.B. Fernandez, B. Loureiro, N.G. Publicover, L. Roman, J.A. Casla, M. A. Gomez // IEEE Trans Biomed Eng, 2001. – № 10. – P. 1134 -1144.
9. Tredici S. A prototype of liquid ventilator using a novel hollow – fiber oxygenator in a rabbit model / S. Tredici, E. Komori, A. Funakudo, D.O. Brant, J.L. Bull, R.H. Bartlett, R.B. Hirschl // Crit Care Med. 2004. – № 10. – P. 2104-2109.
10. Wolfson M.R. Multicenter comparative study of conventional mechanical gas ventilation to tidal liquid ventilation in oleic acid injured sheep / M.R. Wolfson, R.B. Hirschl, J.C. Jackson, F. Gauvin, D.S. Foley, W.J.E. Lamm, J. Gaughan, T.H. Shaffer // ASAIO Journal. 2008. – Vol.54. – P. 256 - 269.
11. Filippenko A.V. Technology of crew survival in a disabled submarine:liquid breathing + urgent free escape // SubSeaTech. – Saint – Peterburg, 2007. – P. 1-11.
12. Белоярцев Ф.Ф. Оценка возможности и адекватности газообмена при вентиляции легких жидкими средами / Ф.Ф. Белоярцев, Х.Х. Хапий, В.С. Черников, Р.А. Мейтина, В.М. Курочкин // Анестезиология и реанимация, 2018. – № 1. – С. 49-52.
13. Corno C. A mathematical model of neonatal tidal liquid ventilation integrating airwaymechanics and gas transfer phenomena / C. Corno, G.B. Fiore, M.L. Costantino // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004. – № 4. – P. 604 - 611.
14. Поливцев В.П. Экспериментальные морские исследования технологии жидкостного дыхания для ныряния/всплытия биологических объектов в капсуле на глубину до 1500 метров / В.П. Поливцев, В.В. Поливцев, К.Н. Осипов // Международная конференция по автоматике и энергетике. – Владивосток, 2021. Том 2096.
15. Мизин В.Т. Расчёт оболочек тонкостенных конструкций / В.Т. Мизин, В.А. Пятнин. – М.: Машиностроение, 1995. – 341 с.
16. Лашнева В.В. Физико – химические свойства покрытия на основе фуллерена C<sub>60</sub> // Материалы МНТК «Трибология и триботехника», - Судак, 2003. – С. 720 – 721.
17. Гайнуллина Я.Н. Обоснование применения специальных глубоководных систем в обеспечении исследований процессов жидкостного дыхания. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2023. – № 3 (353). – С. 144 – 150.

18. Попов С.А. Концентрация напряжений в тонких сферических оболочках / С.А. Попов, Р.Г. Пензин, К. Раджан // Конструирование и технология машиностроения, 1966. – №2. С. 102 – 108.

19. Пат. 201469 Российская Федерация, МПК F15B 3/00. Гидровытеснитель сильфонный для гипербарических установок жидкостного дыхания / Пашков Е.В., Майстришин М. М., Калинин М. И., Поливцев В. В.; заявитель и патентообладатель Фонд перспективных исследований. – № RU2020129068U; заявл. 02.09.2020; опубл. 30.12.2021. Бюл. № 1.

20. Пат. 202283 Российская Федерация, МПК А61М 16/00. Установка для жидкостного дыхания в условиях гипербарии / Пашков Е.В., Поливцев В. П., Калинин М. И., Поливцев В. В.; заявитель и патентообладатель Фонд перспективных исследований. – № RU 2020130508U; заявл. 16.09.2020; опубл. 30.12.2021. Бюл. № 1.

21. Пат. 201542 Российская Федерация, МПК А61Н 31/00. Устройство для сердечно-легочной реанимации / Поливцев В. П., Пашков Е.В., Калинин М. И., Осипов К.Н.; заявитель и патентообладатель Фонд перспективных исследований. – № RU2020130506U; заявл. 16.09.2020; опубл. 30.12.2021. Бюл. № 1.

**Гайнуллина Яна Николаевна**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
Научный сотрудник лаборатории  
«Экспериментальные системы  
жизнеобеспечения биологических  
объектов» г. Севастополь,  
ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

**Калинин Михаил Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
кандидат технических наук,  
доцент, руководитель группы  
лаборатории «Экспериментальные  
системы жизнеобеспечения  
биологических объектов»  
г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
e-mail: kalininsev@mail.ru

**Сопин Павел Константинович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
Старший научный сотрудник  
лаборатории «Экспериментальные  
системы жизнеобеспечения  
биологических объектов»  
г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14  
тел. +7(8692) 417741  
pavel.sopin@gmail.com

---

YA.N. GAINULLINA, M.I. KALININ, P.K. SOPIN

## DESIGN FEATURES OF DEEP-SEA SPHERICAL SHELLS FOR APPARATUSES LIQUID BREATHING

**Abstract.** *The developed and manufactured versions of the closed-cycle liquid breathing apparatus models after a series of laboratory studies in the conditions of normobaria and hyperbaria are undergoing the stage of improving the layout and upgrading the systems of components of elements that meet all technical requirements for operating conditions with the participation of biological objects. This work is devoted to the specifics of designing and manufacturing innovative spherical shells for deep-sea research.*

**Keywords:** *spherical shell, deep-sea equipment, biological objects, liquid respiration.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Kylstra J.A. Of mice as fish / J.A. Kylstra, M.O. Tissing, //A. Trans. Of American Society for Artificial Internal Organs, 1962. – № 1. – P. 378 – 383.
2. Kandler M.A. Persistent Improvement of Gas Exchange and Lung Mechanics by Aerosolized Hardt, E. Schoof, Perfluorocarbon / M.A. Kandler, K. von Rascher // American der J. Dotsch, W. Journal of respiratory and Critical Care Medicine, 2001. – № 1. – P. 31 – 35.
3. Moroz V.V. Zhidkostnaya ventilyatsiya legkikh, ee vozmozhnosti i perspektivi (sovremennoe sostoyanie voprosa) / V.V. Moroz, A.V. Vlasenko, I.O. Zaks // Anesteziologiya i reanimatsiya, 2001. – №6. – S. 66-73.
4. Poptsov V.N. Perviy klinicheskiy opit ispolzovaniya chastichnoy zhidkosnoy ventilyatsii na osnove endobrohialnogo vvedeniya perftorana v kompleksnoy terapii respiratornogo distress – sindroma / V.N. Poptsov, A.E. Balandiuk // Biomeditsinskiy zhurnal, 2004. – Т.5 – S. 173 - 174.
5. Lamaire F. Low – dose perfluorocarbon: a revival for partial liquid ventilation // Critical Care Medicine. 2007. – № 2. – P. 662-663.
6. Corno C. Volume controlled apparatus for neonatal tidal liquid ventilation / C. Corno, G.B. Fiore, E. Martelli, C. Dani, M.L. Costantino // ASAIO Journal, 2003. – № 3. – P. 250 - 258.
7. Degrauwe P.L. Effect of perfluorochemical liquid ventilation cardiac output and blood pressure variability in neonatal piglets with respiratory insufficiency / P.L. Degrauwe, G.D.Vos, G.G. Geskens, J.M. Geilen, C.E. Blanco // Pediatr Pulmonol. 2000. – Vol. 30. – P. 114-124.
8. Polivtsev Polivtsev Polivtsev Polivtsev Polivtsev Polivtsev Tredici S. A prototype of liquid ventilator using a novel hollow – fiber oxygenator in a rabbit model / S. Tredici, E. Komori, A. Funakudo, D.O. Brant, J.L. Bull, R.H. Bartlett, R.B. Hirschl // Crit Care Med. 2004. – № 10. – P. 2104-2109.
9. Wolfson M.R. Multicenter comparative study of conventional mechanical gas ventilation to tidal liquid ventilation in oleic acid injured sheep / M.R. Wolfson, R.B. Hirschl, J.C. Jackson, F. Gauvin, D.S. Foley, W.J.E. Lamm, J. Gaughan, T.H. Shaffer // ASAIO Journal. 2008. – Vol.54. – P. 256 - 269.
10. Filippenko A.V. Technology of crew survival in a disabled submarine:liquid breathing + urgent free escape // SubSeaTech. – Saint – Peterburg, 2007. – P. 1-11.



11. Beloyartsev F.F. Otsenka vozmozhnosti i adekvatnosti gazoobmena pri ventilyatsii legkikh zhidimi sredami / F.F. Белоярцев, Kh.Kh.Khapiy, V.S.Chernikov, P.A. Meytina, V.M. Kurochkin // Anesteziologiya I reanimatsiya, 2018. – № 1. – S. 49-52.
12. Corno C. A mathematical model of neonatal tidal liquid ventilation integrating airway mechanics and gas transfer phenomena / C. Corno, G.B. Fiore, M.L. Costantino // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004. – № 4. – P. 604 – 611.
13. Polivtsev V.P. Eksperimentalnie morskije issledovaniya tekhnologii zhidkostnogo dikhaniya dlya niryaniya / vsplitiya biologicheskikh obektov v kapsule na glybiny do 1500 metrov / V.P. Polivtsev, V.V. Polivtsev, K.N. Osipov // Mezhdunarodnaya konferentsiya po avtomatike i energetike.
14. Polivtsev V.P. Eksperimentalnie morskije issledovaniya tekhnologii zhidkostnogo dikhaniya dlya niryaniya/vsplitiya biologicheskikh obektov v kapsule na glubinu do 1500 metrov / V.P. Polivtsev, V.V. Polivtsev, K.N. Osipov // Mezhdunarodnaya konferentsiya po avtomatike i energetike. – Vladivostok, 2021. Tom 2096.
15. Mizin V.T. Raschet obolochek tonkostennikh konsryktsiy / V.T. Mizin, V.A. Pyatnin. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 341 s.
16. Lashneva V.V. Fiziko – khimicheskije svoystva pokrytiya na osnove fullerene C<sub>60</sub> // Materiali MNTK «Tribologiya i tribotekhnika», - Sydak, 2003. – S. 720 – 721.
17. Gaynullina Ya.N. Obosnovanie primeneniya spetsialnih glybokovodnykh sistem v obespechenii isledovaniy protsesov zhidkostnogo dikhaniya. Fyundamentalnie i prikladnie problemi tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Tergeneva, 2023. – № 3 (353). – S. 144 – 150.
18. Popov S.A. Kontsentratsiya napryazheniy v tonkikh sfericheskikh obolochkakh / S.A. Popov, R.G. Penzin, K.Radzhan // Konstryirovanie napryazheniy v tonkikh sfericheskikh obolochkakh, 1966. – №2. S. 102 – 108.
19. Pat. 201469 Rossiyskaya federatsiya, MPK F15B 3/00. Gidrovitesnitel silfonnyy dlya giperbaricheskikh ystanovok zhidkostnogo likhaniya / Pashkov E.V., Maystriushin M.M., Kalinin M.I., Polivtsev V.V.; zayavitel i patentoobladatel Fond perspektivnykh issledovaniy. – № RU2020129068U; zayavl. 02.09.2020; opubl. 30.12.2021. biul. № 1.
20. Pat.202283 Rossiyskaya federatsiya, MPK A61M 16/00. Ustanovka dlya zhidkostnogo likhaniya v usloviyakh giperbarii / Pashkov E.V., Polivtsev V.P., Kalinin M.I., Polivtsev V.V.; zayavitel i patentoobladatel Fond perspektivnykh issledovaniy.; zayavl. 16.09.2020; opubl. 30.12.2021. biul. № 1.
21. Pat.201542 Rossiyskaya federatsiya, MPK A61H 31/00. Ustroistvodlya serdechno – legochnoi reanimatsii / Polivtsev V.P., Pashkov E.V., Kalinin M.I., Osipov K.N.; zayavitel i patentoobladatel Fond perspektivnykh issledovaniy.; zayavl. 16.09.2020; opubl. 30.12.2021. biul. № 1.

**Gaynullina Yana Nikolaevna**  
Sevastopol State University,  
Researcher at the laboratory  
"Experimental life Support  
systems of biological objects",  
Sevastopol,  
Gogol str., 14  
tel. +7(8692) 417741  
e-mail: medeya-ru@yandex.ru

**Kalinin Mikhail Ivanovich**  
Sevastopol State University,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Head of the  
laboratory group "Experimental life  
support systems for biological objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14 tel.  
+7(8692) 417741  
e-mail: kalinin sv@ mail.ru

**Sopin Pavel Konstantinovich**  
Sevastopol State University,  
Senior researcher of the laboratory  
"Experimental life support systems of  
biological objects"  
Sevastopol, Gogol str., 14  
tel. +7(8692) 417741  
pavel.sopin@gmail.com

© Я.Н. Гайнуллина, М.И. Калинин, П.К. Сопин, 2024

УДК 612.15

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-122-129

А.В. ЖИДКОВ, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, Д.В. ДЕНИСОВ, В.П. НЕМОВ, А.В. СЕМИЧЕВ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ИМПЕДАНСА И СКОРОСТИ КРОВОТОКА В ЛЕВОЙ СОННОЙ АРТЕРИИ**

**Аннотация.** Проведен анализ методов оценки скорости кровотока для решения проблемы своевременного диагностирования тромбоза. Выделены основные измеряемые величины при оценке скорости кровотока. установлена корреляция результатов, полученных методами ультразвуковой доплерографии и электроплетизмографии. Построена линейная регрессионная модель, позволяющая осуществить переход от одной измеряемой величине к другой.

**Ключевые слова:** тромбоз, ультразвуковая доплерография, скорость кровотока, электроплетизмография.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Damilola Ashorobi, Muhammad Atif Ameer, Roberto Fernandez. Thrombosis. 2023. 11.

2. Cushman M. Epidemiology and risk factors for venous thrombosis // *Seminars in hematology*. 2007. 44. № 2. С. 62–69.
3. Ультразвук в медицине. Физические основы применения / Сост. К. Хилл [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 544 с.
4. А.В. Холин, Е.В. Бондарева. Допплерография и дуплексное сканирование сосудов. М.: МЕДпресс-информ, 2019. 96 с.
5. Илясов Л. В. Биомедицинская измерительная техника: учебное пособие для вузов. 2-е изд. Москва: Издательство Юрайт, 2020. 329 с.
6. Залетов И. С., Сагайдачный А. А., Скрипаль А. В., Ключков В. А., Майсков Д. И., Фомин А. В. Взаимосвязь формы пульсовой волны в периферических артериях, регистрируемой методами импедансной реографии и ультразвуковой доплерографии // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2023. 23. № 1. С. 24–36.
7. Акопян В.Б., Ершов Ю.А. Ультразвук в медицине, ветеринарии и биологии: учебное пособие для среднего профессионального образования. 2-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2020. 211 с.

**Жидков Алексей Владимирович**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
 Кандидат технических наук кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
 E-mail: epipro@rambler.ru

**Немов Виталий Павлович**  
 ФГБОУ «ОГУ имени И. С. Тургенева», г. Орёл  
 Студент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
 E-mail: nemov vitalik2014@yandex.ru

**Семичев Артем Витальевич**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
 Студент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе,  
 E-mail: 9125346@mail.ru

**Денисов Дмитрий Витальевич**  
 ФГБОУ «ОГУ имени И. С. Тургенева», г. Орёл  
 Студент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
 E-mail: 4567426@mail.ru

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
 Доктор технических наук кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
 E-mail: asms-orel@mail.ru

A.V. ZHIDKOV, K.V. PODMASTEREV, D.V. DENISOV, V.P. NEMOV, A.V. SEMICHEV

## STUDY OF THE CORRELATION OF CHANGES IN IMPEDANCE AND BLOOD FLOW VELOCITY IN THE LEFT CAROTID ARTERY

**Abstract.** *An analysis of methods for assessing blood flow velocity to solve the problem of timely diagnosis of thrombosis was carried out. The main measured quantities when assessing blood flow velocity are highlighted. A correlation was established between the results obtained by ultrasound Dopplerography and electroplethysmography. A linear regression model has been constructed that allows the transition from one measured value to another.*

**Keywords:** *thrombosis, doppler ultrasound, blood flow velocity, electroplethysmography.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Damilola Ashorobi, Muhammad Atif Ameer, Roberto Fernandez. *Thrombosis*. 2023. 11.
2. Cushman M. Epidemiology and risk factors for venous thrombosis // *Seminars in hematology*. 2007. 44. No. 2. pp. 62–69.
3. *Ultrasound in medicine. Physical basis of application / Comp. K. Hill [et al.]*. М.: FIZMATLIT, 2008. 544 p.
4. A.V. Kholin, E.V. Bondareva. *Dopplerography and duplex scanning of blood vessels*. М.: MEDpress-inform, 2019. 96 p.
5. Ilyasov L.V. *Biomedical measuring technology: a textbook for universities*. 2nd ed. Moscow: Yurayt Publishing House, 2020. 329 p.
6. Zaletov I. S., Sagaidachny A. A., Skripal A. V., Klochkov V. A., Mayskov D. I., Fomin A. V. Relationship between the shape of the pulse wave in peripheral arteries recorded by impedance rheography and Doppler ultrasound // *News of Saratov University. New episode. Series: Physics*. 2023. 23. No. 1. pp. 24–36.
7. Akopyan V.B., Ershov Yu.A. *Ultrasound in medicine, veterinary medicine and biology: a textbook for secondary vocational education*. 2nd ed. М.: Yurayt Publishing House, 2020. 211 p.

**Zhidkov Aleksey Vladimirovich**  
Orel State University,  
Candidate of Technical Sciences, Department of  
Instrument Engineering, Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: epipro@rambler.ru

**Nemov Vitaly Pavlovich**  
Orel State University,  
Student of the Department of Instrument Engineering,  
Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: nemov-vitalik2014@yandex.ru

**Podmasteryev Konstantin Valentinovich**  
Orel State University,  
Doctor of Technical Sciences, Department of  
Instrument Engineering, Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Denisov Dmitry Vitalievich**  
Orel State University,  
Student of the Department of Instrument Engineering,  
Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: 4567426@mail.ru

**Semichev Artem Vitalievich**  
Orel State University,  
Student of the Department of Instrument Engineering,  
Metrology and Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: 9125346@mail.ru

© А.В. Жидков, К.В. Подмастерьев, Д.В. Денисов, В.П. Немов, А.В. Семичев, 2024

## **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 004.946:658.51

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-130-140

Г.Х. ИРЗАЕВ

### **УПРАВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В ИЗДЕЛИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

**Аннотация.** Рассмотрены понятия виртуальной VR и дополненной реальности AR и возможности их использования в проектировании и производстве изделий радиоэлектронного приборостроения. Проведен анализ использования технологий цифрового производства для поддержки проведения инженерных изменений в производстве. Выделены этапы и информационные потоки при проведении требований об инженерных изменениях на предприятии. Отмечено, что на предприятии циркулируют информационные потоки, связанные с генерацией, рассмотрением, согласованием и внесением в документацию инженерных изменений. Процесс управления инженерными изменениями формализован в виде трех этапов: инициализации, реализации и оценки результата. Выделены свойства виртуальной и дополненной реальности, которые позволяют применять их для управления инженерными изменениями: сотрудничество, погружение, аннотации и взаимодействие. Проведен анализ каждого шага процесса управления инженерными изменениями с точки зрения применимости и эффективности инструментария AR/VR-технологий, предложена концептуальная модель.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, дополненная реальность, инженерное изменение, проектирование, производство, радиоэлектронное приборостроение, цифровая среда.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Kaiser, R., Schatsky, D. For more companies, new ways of seeing. Momentum is building for augmented and virtual reality in the enterprise // Deloitte University Press. URL: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3768\\_Signals-for-Strategists\\_Apr2017/DUP\\_Signals-for-Strategists\\_Apr-2017.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3768_Signals-for-Strategists_Apr2017/DUP_Signals-for-Strategists_Apr-2017.pdf). 2017.
2. Иванова, А.В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения / А.В. Иванова // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 3. – С. 88-107.
3. Aurich, J.C., Röβing, M. Engineering Change Impact Analysis in Production Using VR, in Digital Enterprise Technology, Springer US, Boston, MA, – 2007. – p. 75-82.
4. Ирзаев, Г.Х. Обеспечение цифрового технического сервиса и поддержки умного радиоэлектронного производства / Г.Х. Ирзаев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2023. – № 10. – С. 3-7.

5. Menck, N., Yang, X., Weidig, C., Winkes, P. et al. Collaborative Factory Planning in Virtual Reality 3. – 2012. – p. 317.
6. Yang, X., Malak, R.C., Lauer, C., Weidig, C. et al. Virtual Reality enhanced manufacturing system design. – 2011. – p. 125.
7. Menck, N., Weidig, C., Aurich, J.C. Virtual Reality as a Collaboration Tool for Factory Planning based on Scenario Technique 7. – 2013. – p. 133.
8. Gong, L., Berglund, J., Fast-Berglund, Å., Johansson, B. et al. Development of virtual reality support to factory layout planning 13. – 2019. – p. 935.
9. Shariatzadeh, N., Sivard, G., Chen, D. Software Evaluation Criteria for Rapid Factory Layout Planning, Design and Simulation 3. – 2012. – p. 299.
10. Galambos, P., Csapó, Á., Zentay, P., Fülöp, I.M. et al., 2015. Design, programming and orchestration of heterogeneous manufacturing systems through VR-powered remote collaboration 33. – 2015. – p. 68.
11. Aschenbrenner, D., Li, M., Dukalski, R., Verlinden, J. et al. Collaborative Production Line Planning with Augmented Fabrication, in 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). – 2019. – p. 509.
12. Alcácer, V., Cruz-Machado, V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. – 2019. – p. 213.
13. Abidi, M.-A., Lyonnet, B., Chevaillier, P., Toscano, R. et al. Simulation of Manufacturing Processes via Virtual Reality, in Virtual and Augmented Reality, IGI Global. – 2018. – p. 918.
14. Wang, X., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., A comprehensive survey of augmented reality assembly research 4. – 2016. – p. 1.
15. Wiedenmaier, S., Oehme, O., Schmidt, L., Luczak, H. Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation 16. – 2003. – p. 497.
16. Juraschek, M., Büth, L., Posselt, G., Herrmann, C. Mixed Reality in Learning Factories 23. – 2018. – p. 153.
17. Wang, X., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., A comprehensive survey of augmented reality assembly research 4. – 2016. – p. 1.
18. Schwerdtfeger, B., Alt, T., Klinker, G., Augmented Reality / Mobile Vision zur aktiven Fehlervermeidung. – 2016.
19. Oh, S., Byun, Y.-C. The Design and Implementation of Augmented Reality Learning Systems, in 2012 IEEE/ACIS 11th International Conference on Computer and Information Science, IEEE. – 2012. – p. 651.
20. Nee, A.Y.C., Ong, S.K., Chryssolouris, G., Mourtzis, D. Augmented reality applications in design and manufacturing 61. – 2012. – p. 657.
21. Zhu, J., Nee, A.Y.C., Ong, S.-K. Online Authoring for Augmented Reality Remote Maintenance, in Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications / 722: Computer Graphics and Imaging, ACTAPRESS, Calgary, AB, Canada. – 2011. – p. 349.
22. Ирзаев, Г.Х. Анализ процессов внесения инженерных изменений в конструкцию радиоэлектронных средств на этапах проектирования и освоения серийного производства / Г.Х. Ирзаев // Вопросы радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 72-78.

**Ирзаев Гамид Хайбулаевич**

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», г. Махачкала

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем

367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70

Тел.: +7 (8722) 62-39-65

E-mail: irzajev@mail.ru

G.Kh. IRZAEV

## MANAGEMENT OF ENGINEERING CHANGES IN RADIO-ELECTRONIC INSTRUMENT PRODUCTS USING VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES

**Abstract.** *The concepts of virtual VR and augmented reality AR and the possibilities of their use in the design and production of radio-electronic instrumentation products are considered. An analysis was made of the use of digital manufacturing technologies to support engineering changes in production. The stages and information flows when carrying out requirements for engineering changes at the enterprise are highlighted. It is noted that the enterprise circulates information flows related to the generation, review, approval and introduction of engineering changes to the documentation. The engineering change management process is formalized in three stages: initialization, implementation and evaluation of the result. The properties of virtual and augmented reality are highlighted that allow them to be used for engineering change management: collaboration, immersion, Abstract and interaction. An analysis of each step of the engineering change management process was carried out from the point of view of the applicability and effectiveness of AR/VR technology tools, and a conceptual model was proposed.*

**Keywords:** *virtual reality, augmented reality, engineering change, design, production, electronic instrument engineering, digital environment.*

BIBLIOGRAPHY

1. Kaiser, R., Schatsky, D. For more companies, new ways of seeing. Momentum is building for augmented and virtual reality in the enterprise // Deloitte University Press. URL: [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3768\\_Signals-for-Strategists\\_Apr2017/DUP\\_Signals-for-Strategists\\_Apr-2017.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3768_Signals-for-Strategists_Apr2017/DUP_Signals-for-Strategists_Apr-2017.pdf). 2017.
2. Ivanova, A.V. Tekhnologii virtualnoj i dopolnennoj realnosti: vozmozhnosti i prepyatstviya primeneniya / A.V. Ivanova // Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment. – 2018. – № 3. – S. 88-107.
3. Aurich, J.C., Röbbing, M. Engineering Change Impact Analysis in Production Using VR, in Digital Enterprise Technology, Springer US, Boston, MA, – 2007. – p. 75-82.
4. Irzaev, G.Kh. Obespechenie cifrovogo tekhnicheskogo servisa i podderzhki umnogo radioelektronogo proizvodstva / G.Kh. Irzaev // Remont, vosstanovlenie, modernizaciya. – 2023. – № 10. – S. 3-7.
5. Menck, N., Yang, X., Weidig, C., Winkes, P. et al. Collaborative Factory Planning in Virtual Reality 3. – 2012. – p. 317.
6. Yang, X., Malak, R.C., Lauer, C., Weidig, C. et al. Virtual Reality enhanced manufacturing system design. – 2011. – p. 125.
7. Menck, N., Weidig, C., Aurich, J.C. Virtual Reality as a Collaboration Tool for Factory Planning based on Scenario Technique 7. – 2013. – p. 133.
8. Gong, L., Berglund, J., Fast-Berglund, Å., Johansson, B. et al. Development of virtual reality support to factory layout planning 13. – 2019. – p. 935.
9. Shariatzadeh, N., Sivard, G., Chen, D. Software Evaluation Criteria for Rapid Factory Layout Planning, Design and Simulation 3. – 2012. – p. 299.
10. Galambos, P., Csapó, A., Zentay, P., Fülöp, I.M. et al., 2015. Design, programming and orchestration of heterogeneous manufacturing systems through VR-powered remote collaboration 33. – 2015. – p. 68.
11. Aschenbrenner, D., Li, M., Dukalski, R., Verlinden, J. et al. Collaborative Production Line Planning with Augmented Fabrication, in 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). – 2019. – p. 509.
12. Alcácer, V., Cruz-Machado, V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. – 2019. – p. 213.
13. Abidi, M.-A., Lyonnet, B., Chevaillier, P., Toscano, R. et al. Simulation of Manufacturing Processes via Virtual Reality, in Virtual and Augmented Reality, IGI Global. – 2018. – p. 918.
14. Wang, X., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., A comprehensive survey of augmented reality assembly research 4. – 2016. – p. 1.
15. Wiedenmaier, S., Oehme, O., Schmidt, L., Luczak, H. Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation 16. – 2003. – p. 497.
16. Juraschek, M., Büth, L., Posselt, G., Herrmann, C. Mixed Reality in Learning Factories 23. – 2018. – p. 153.
17. Wang, X., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., A comprehensive survey of augmented reality assembly research 4. – 2016. – p. 1.
18. Schwerdtfeger, B., Alt, T., Klinker, G., Augmented Reality / Mobile Vision zur aktiven Fehlervermeidung. – 2016.
19. Oh, S., Byun, Y.-C. The Design and Implementation of Augmented Reality Learning Systems, in 2012 IEEE/ACIS 11th International Conference on Computer and Information Science, IEEE. – 2012. – p. 651.
20. Nee, A.Y.C., Ong, S.K., Chryssolouris, G., Mourtzis, D. Augmented reality applications in design and manufacturing 61. – 2012. – p. 657.
21. Zhu, J., Nee, A.Y.C., Ong, S.-K. Online Authoring for Augmented Reality Remote Maintenance, in Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications / 722: Computer Graphics and Imaging, ACTAPRESS, Calgary, AB, Canada. – 2011. – p. 349.
22. Irzaev, G.Kh. Analiz processov vneseniya inzhenernyh izmenenij v konstrukciyu radioelektronnyh sredstv na etapah proektirovaniya i osvoeniya serijnogo proizvodstva / G.Kh. Irzaev // Voprosy radioelektroniki. – 2016. – № 11. – S. 72-78.

**Irzaev Gamid Khaibulaevich**

Dagestan State Technical University, Makhachkala

candidate of technical sciences, associate professor of the department of computer software and automated systems

367026, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70

Tel.: +7 (8722) 62-39-65

E-mail: irzajev@mail.ru

© Г.Х. Ирзаев, 2024

**МАТЕРИАЛЫ XXI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ "ЭНЕРГО-И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК"**

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ ВЯЗКИХ ВЕЩЕСТВ

**Аннотация.** В статье рассмотрено устройство для смешивания клея. Исходная система управления работает с одинаковыми временными параметрами при перемешивании состава и в период остановки механизма, что зачастую приводит к перегреву двигателя, увеличению расхода электроэнергии, поэтому стандартная схема нуждается в модернизации. Для решения перечисленных проблем предлагается внедрение в систему управления частотного преобразователя, управление которым осуществляется от нечеткого регулятора. Предлагаемый нечеткий регулятор – это принципиально новое решение, не базирующееся на регуляторах, имеющихся в стандартной библиотеке Matlab. Использование разработанного регулятора в системе управления механизма для перемешивания клея позволяет добиться энергосбережения до 15,3 процентов по сравнению с исходной системой управления.

**Ключевые слова:** моделирование, электропривод, нечеткий регулятор.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авт. св. 1286259U1 СССР, МПК В01F 7/00, G05D 27/00, Устройство для регулирования процесса перемешивания в аппаратах с мешалкой / Тарасов М. Б., Бродский А. С., Интезарян Э. А., Науменко А. П.; заявитель и патентообладатель Грозненское Научно-Производственное Объединение «Промавтоматика». – № 3954972/24-26; заявл. 16.09.85; опубл. 30.01.87. Бюл. №4.
2. Торубаров, Н. Н. Перемешивающие устройства со сложным законом движения мешалок / Н. Н. Торубаров, Р. М. Малышев // Известия МГТУ. – 2014. – №2 (20). – С. 88-91.
3. Мудров, А. Г. Конструкции и модель смешения в аппаратах с мешалкой / А. Г. Мудров, // Известия КазГАСУ. – 2018. – №1 (43). – С. 226-233.
4. Schreiber, H. The application of a vector controlled AC drive for internal batch mixing of rubber compounds / H. Schreiber // Conference Record of 1991 Forty-third Annual Conference Electrical Engineering Problems in the Rubber and Plastics Industries, Akron, OH, USA. – 1991. – pp. 6-9.
5. Mingxia, C. Design and Implementation of Glue Supply Control System Based on Fuzzy Pid / C. Mingxia, Z. Haitao and L. Zhifen, // 2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Qiqihar, China – 2019. – pp. 19-22.
6. Локтева, И. Л. Принципы построения систем регулирования электроприводов с двигателями переменного тока / И. Л. Локтева, Г. Б. Онищенко, Т. В. Плотникова, Ю. Г. Шакарнян // Электричество № 5. – 1976 г. – С. 6-12.
7. Константинов, И.С.. Принципы построения интеллектуальных автоматизированных систем управления с нечетким регулированием на базе логико-лингвистических моделей представления знаний / И.С. Константинов, А.Г. Филатов, Ю.В. Касьянов // Сборник трудов Седьмых Академических чтений РААСН: Современные проблемы строительного материаловедения. Белгород. – 2001. – С.154-158.
8. Li, L. Design of Gluing Process Control System Based on DCS System / L. Li, W. Yang, M. Duan and L. Wei // 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China – 2019. – pp. 1430-1434.

**Синюкова Татьяна Викторовна**  
ФГБОУ ВО «Липецкий  
государственный технический  
университет», г. Липецк  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры электропривода  
398055, г. Липецк., Московская,  
30.  
Тел. (4742) 328180  
E-mail: stw0411@mil.ru

**Мещеряков Виктор Николаевич**  
ФГБОУ ВО «Липецкий  
государственный технический  
университет», г. Липецк  
Доктор технических наук,  
заведующий кафедрой  
электропривода  
398055, г. Липецк., Московская,  
30.  
Тел. (4742) 328180  
E-mail: mesherek@yandex.ru

**Синюков Алексей  
Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Липецкий  
государственный технический  
университет», г. Липецк  
ассистент, кафедры  
электропривода  
398055, г. Липецк., Московская,  
30.  
Тел. (4742) 328180  
E-mail: zeitsn@yandex.ru

---

T.V. SINYUKOVA, V.N. MESHCHERYAKOV, A.V. SINYUKOV

## THE USE OF FUZZY REGULATORS IN THE SYSTEM OF EQUALIZATION OF MECHANISMS FOR MIXING VISCIOUS SUBSTANCES

**Abstract.** *The article discusses a device for mixing glue. The original control system operates with the same time parameters when mixing the composition and during the period when the mechanism is stopped, which often leads to overheating of the engine and increased energy consumption, so the standard scheme needs to be modernized. To solve these problems, it is proposed to introduce a frequency converter into the control system, which is controlled by a fuzzy controller. The proposed fuzzy controller is a fundamentally new solution that is not based on the controllers available in the standard Matlab library. The use of the developed regulator in the control system of the glue mixing mechanism allows achieving energy savings of up to 15.3 percent compared to the original control system.*

**Keywords:** modeling, electric drive, fuzzy controller.

## BIBLIOGRAPHY

1. Auto. St. 1286259U1 USSR, MPK B01F 7/00, G05D 27/00, Device for regulating the mixing process in apparatus with a stirrer / Tarasov M. B., Brodsky A. S., Intezaryan E. A., Naumenko A. P.; applicant and patent holder Grozny Research and Production Association "Promavtomatika". – No. 3954972/24-26; application 09.16.85; publ. 01/30/87. Bull. No. 4.
2. Torubarov, N. N. Mixing devices with a complex law of movement of mixers / N. N. Torubarov, R. M. Malyshev // Izvestia MGTU. – 2014. – No. 2 (20). – pp. 88-91.
3. Mudrov, A. G. Designs and model of mixing in apparatus with a stirrer / A. G. Mudrov, // News of KazGASU. – 2018. – No. 1 (43). – pp. 226-233.
4. Schreiber, H. The application of a vector controlled AC drive for internal batch mixing of rubber compounds / H. Schreiber // Conference Record of 1991 Forty-third Annual Conference Electrical Engineering Problems in the Rubber and Plastics Industries, Akron, OH, USA. – 1991. – pp. 6-9.
5. Mingxia, C. Design and Implementation of Glue Supply Control System Based on Fuzzy Pid / C. Mingxia, Z. Haitao and L. Zhifen, // 2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Qiqihar, China – 2019. – pp. 19-22.
6. Lokteva, I. L. Principles of constructing control systems for electric drives with AC motors / I. L. Lokteva, G. B. Onishchenko, T. V. Plotnikova, Yu. G. Shakarnyan // Electricity No. 5. – 1976 - pp. 6-12.
7. Konstantinov, I.S.. Principles of constructing intelligent automated control systems with fuzzy regulation based on logical-linguistic models of knowledge representation / I.S. Konstantinov, A.G. Filatov, Yu.V. Kasyanov // Collection of works of the Seventh Academic Readings of the RAASN: Modern problems of construction materials science. Belgorod. – 2001. – P.154-158.
8. Li, L. Design of Gluing Process Control System Based on DCS System / L. Li, W. Yang, M. Duan and L. Wei // 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) ), Chongqing, China – 2019. – pp. 1430-1434.

**Sinyukova Tatyana Viktorovna**  
FSBEI of HE Lipetsk State  
Technical  
University, Lipetsk  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Electric  
Drive Department  
398055, Lipetsk, Moskovskaya,  
30.  
Tel. (4742) 328180  
E-mail: stw0411@mil.ru

**Meshcheryakov Viktor Nikolayevich**  
FSBEI of HE Lipetsk State Technical  
University, Lipetsk  
Doctor of Technical Sciences, Head of  
the Electric Drive Department  
398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30.  
Tel. (4742) 328056  
E-mail: mesherek@yandex.ru

**Sinyukov Alexey Vladimirovich**  
FSBEI of HE Lipetsk State  
Technical University, Lipetsk  
assistant, department of electric drive  
398055, Lipetsk, Moskovskaya, 30.  
Tel. (4742) 328180  
E-mail: zeitsn@yandex.ru

© Т.В. Синюкова, В.Н. Мещеряков, А.В. Синюков, 2024

УДК 620.185.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-149-157

К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, В.В. МАРКОВ, В.В. МИШИН, А.В. СЕЛИХОВ, Н.В. УГЛОВА

## ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, КАЧЕСТВА, НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ОПОР КАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Аннотация:** обоснована необходимость проведения мониторинга технического состояния опор качения электрических машин. Предложено использовать электрическое сопротивление подшипника в качестве показателя технического состояния опоры качения. Представлены результаты математического моделирования электрического сопротивления в виде функции сопротивления от факторов внутренней среды подшипника и режимов его сборки и эксплуатации в опоре качения. Предложен электрорезистивный метод мониторинга технического состояния опор качения, отличающийся от известных методов оригинальными алгоритмами сбора информации о состоянии деталей подшипников, проведены экспериментальные исследования, подтверждающие работоспособность данного метода.

**Ключевые слова:** качество; надёжность; безопасность; электрическая машина; мониторинг; опора

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общей ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн.2: Электрический контроль. / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
3. Подмастерьев, К.В. Прогнозирование перспектив развития методов мониторинга узлов трения машин по результатам патентных исследований / К.В. Подмастерьев, В.В. Марков // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России. Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция. Редакционная коллегия: Пудов Е.Ю. (ответственный редактор), Клаус О.А. (ответственный редактор), Бершполец С.И., Конопля А.А., 2014. С. 329-331.
4. Дёмкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология / Н.Б. Дёмкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
5. Коднир, Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин / Д.С. Коднир // М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
6. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
7. Ковалев, М.П. Расчет высокоточных шарикоподшипников / М.П. Ковалев, Н.З. Народецкый // 2-е изд. – М.: Машиностроение. – 1980. – 373 с.
8. Галахов М.А. Расчет подшипниковых узлов / М.А. Галахов, А.Н. Бурмистров. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
доктор технических наук, профессор, директор  
института приборостроения, автоматизации и  
информационных технологий ФГБОУ ВО  
«Орловский государственный университет имени  
И.С. Тургенева».  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95.  
Тел.: +7-953-615-59-31  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Мишин Владислав Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой электроники, радиотехники и систем связи  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева».  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел.: 8-920-825-50-47  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

**Углова Нина Владимировна**  
кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации ФГБОУ ВО  
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел.: 8-920-825-50-47;  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

**Марков Владимир Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего  
кафедрой приборостроения, метрологии и сертификации  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева».  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95.  
Тел.: 8-920-825-50-47  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

**Селихов Алексей Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
приборостроения, метрологии и сертификации ФГБОУ  
ВО «Орловский государственный университет имени  
И.С. Тургенева».  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел.: 8-920-825-50-47  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

---

K.V. PODMASRERYEV, V.V. MARKOV, V.V. MISHIN, A.V. SELIKHOV, N.V. UGLOVA

## ELECTRORESISTIVE METHOD FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION, QUALITY, RELIABILITY AND SAFETY THE SUPPORTS OF ROLLING OF ELECTRICAL MACHINES

***Abstract.** The necessity of monitoring the technical condition of the rolling supports of electric machines has been substantiated. It is proposed to use the electrical resistance of the bearing as an indicator of the technical condition the rolling support. The results of mathematical modeling of electrical resistance in the form of a function of resistance from factors of the internal environment of the bearing and modes of its assembly and operation in a rolling bearing are presented. An electroresistive method for monitoring the technical state the rolling support is proposed, which differs from the known methods by original algorithms for collecting information about the state of bearing parts, experimental studies have been carried out to confirm the efficiency of this method.*

***Keywords:** quality; reliability; security; electrical mashine; monitoring; rolling support; rolling bearing; electrical resistance.*

## BIBLIOGRAPHY



1. Podmasteryev K. V. Electroparametric methods of complex diagnostics of rolling bearings / K.V. Podmasteryev. M.: Mashinostroenie-1, 2001. – 376 p.
2. Markov, V. V. Control of rolling bearings by parameters of electrical resistance / V. V. Markov, V. V. Mishin // Control. Diagnostics. N. 9. – 2004. – P. 35.
3. Podmasteryev K. V. Investigation of the influence of macrodeviations of raceways of rings on the state of lubrication in a bearing by the electroresistive method / K. V. Podmasteryev, V. V. Mishin, V. V. Markov // Friction and Wear. T. 26. N. 5. – 2005. – P. 546-553.
4. Demkin N. B. Theory of contact of real surfaces and tribology / N. B. Demkin // Friction and Wear. T. 16. N. 6. – 2005 – P. 1003-1024.
5. Kodnir D. S. Contact hydrodynamics of lubrication of machine parts / D. S. Kodnir // M.: Mechanical Engineering. – 1976. – 304 p.
6. Myshkin N. K. Tribology. Principles and applications / N. K. Myshkin, M. I. Petrokovets. - Gomel: IMMS NASB. – 2002. – 310 p.
7. Kovalev M. P. Calculation of high-precision ball bearings / M. P. Kovalev, N. Z. Narodetsky // 2 ed. M.: Mechanical engineering. – 1980. – 373 p.
8. Galakhov M. A. Calculation of bearing assemblies / M. A. Galakhov, A. N. Burmistrov. M.: Mashinostroenie. – 1988. – 272 p.

**Podmasteryev Konstantin Valentinovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Instrument Engineering, Automation and Information Technologies Oryol State University named after I. S. Turgenev, 95 Komsomolskaya str., Orel, 302026.  
Phone: +7-953-615-59-31  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Markov Vladimir Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification Oryol State University named after I. S. Turgenev, 95 Komsomolskaya str., Orel, 302026.  
Phone: 8-920-825-50-47  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

**Mishin Vladislav Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electronics, Radiotechnics and System of Communication Oryol State University named after I. S. Turgenev, 95 Komsomolskaya str., Orel, 302026.  
Phone.: 8-920-825-50-47  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

**Selikhov Alexey Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification Oryol State University named after I. S. Turgenev, 95 Komsomolskaya str., Orel, 302026.  
Phone.: 8-920-825-50-47  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

**Uglova Nina Vladimirovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification Oryol State University named after I. S. Turgenev, 95 Komsomolskaya str., Orel, 302026.  
Phone.: 8-920-825-50-47;  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

© К.В. Подмастерьев, В.В. Марков, В.В. Мишин, А.В. Селихов, Н.В. Углова, 2024

УДК 631.171

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-158-164

О.К. НИКОЛЬСКИЙ, Л.В. КУЛИКОВА, В.В. ФАРАНОСОВ, Д.О. СУРИНСКИЙ

## **МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО РИСКА ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы управления рисками в человеко-машинной системе, приведены основные модели и методы принятия решений, «человек - электроустановка - среда». Рассмотрен метод анализа риска и предложен экспертно-программный комплекс, реализующий оценку рисков опасности электроустановок.

**Ключевые слова:** человеко-машинная система, управление рисками, электроустановка, многокритериальный анализ, метод анализа риска, «галстук-бабочка», пожарный риск опасности электроустановок, имитационная модель.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Никольский, О.К. Моделирование техногенных рисков электроустановок производственных объектов на основе анализа человеко-машинных систем / О.К. Никольский, Ю.Д. Шлионская, И.А. Шаныгин // Электротехника. – 2018. – № 12. – С. 37-44.
2. Никольский, О.К. Математическая модель оценки и управления рисками аварий в системах электроснабжения / О.К. Никольский, Л.Ю. Качесова, И.А. Шаныгин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 10. – С. 72-77.
3. Ногин, В.Д. Использование количественной информации об относительной важности критериев в принятии решений / В.Д. Ногин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2000, № 2. – с. 89-93.
4. Плохов, И.В. Структура и алгоритмы имитационного моделирования динамики электрофрикционного взаимодействия / И.В. Плохов, А.В. Ильин, О.И. Козырева // Вестник ПсковГУ. – 2014, № 4. – с. 192-199.
5. Государственный доклад «О состоянии защиты и населения и территории Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году. – М.: МЧС России, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021, 204 с.
6. Романов, В.Н. Техника анализа сложных систем. – СПб: СЗТУ. – 2011. – 287 с.
7. Клименков, Г.В. Экспертные системы и системы ситуационного управления на базе логико-лингвистических моделей / Г.В. Клименков, Б.Л. Кукор // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. 2017, № 1. – С. 7-19.
8. Gulyakina, N.A., Yazyki i tekhnologii programmirovaniya, orientirovannye na obrabotku semanticheskikh setej [Programming languages and technologies focused on processing of semantic networks] / N.A. Gulyakina, O.V. Pivovarchik, D.A. Lazurkin // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektualnykh sistem» [Proc. of the International Scientific and Technical Conference «Open semantic technology of intelligent systems»]. – Minsk: BGUIR publ., 2012 - p. 221-228.
9. Рыбина Г.В. Экспертные системы и инструментальные средства для их разработки: некоторые итоги // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2023. Т. 21. № 2. С. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.18127/j0700814-202302-05>.
10. Муравьев, И.И. Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И.И. Муравьев, В.А. Острейковский, Е.Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 24–27.

**Никольский Олег Константинович**  
 ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
 технический университет им. И.И. Ползунова», г.  
 Барнаул,  
 Доктор технических наук, профессор,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный  
 электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88

**Куликова Лидия Васильевна**  
 ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
 технический университет им. И.И. Ползунова», г.  
 Барнаул,  
 Доктор технических наук, профессор,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный  
 электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88

**Фараносов Вадим Викторович**  
 ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
 технический университет им. И.И. Ползунова», г.  
 Барнаул,  
 Аспирант,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный  
 электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88

**Суринский Дмитрий Олегович**  
 ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет  
 Северного Зауралья», г. Тюмень,  
 Кандидат технических наук, доцент,  
 Кафедра «Энергообеспечение сельского хозяйства»  
 625003, г. Тюмень, ул. Республики, 7  
 Тел. (3452) 290-103

O  
K  
**MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC HAZARD RISK  
OF ELECTRICAL INSTALLATIONS BASED ON SIMULATION  
MODELING**  
O  
I  
S  
K  
Y  
V  
K  
U  
L

**Abstract.** *The article discusses the issues of risk management in the human-machine system, provides the main models and methods of decision-making, "man - electrical installation - environment". The method of risk analysis is considered and an expert-software complex is proposed, which implements the risk assessment of the hazard of electrical installations.*

**Keywords:** *human-machine system, risk management, electrical installation, multi-criteria analysis, risk analysis method, bow tie, fire hazard risk of electrical installations, stimulation model.*

1. Nikolskiy O.K., Shlionskaya Yu.D., Shanygin I.A. Modelirovanie tekhnogennykh riskov elektroustanovki proizvodstvennykh obektiv na osnove analiza cheloveko-mashinnykh sistem / O.K. Nikolskiy, Yu.D. Shlionskaya, I.A. Shanygin // Elektrotehnika. – 2018. – № 12. S. 37-44.
2. Nikolskiy O.K., Kachesova L.Yu., Shanygin I.A. Mathematical model of assessment and management of risks of accidents in electric supply systems / O.K. Nikolskiy, L.Yu. – 2018. – № 10. S. 72-77.
3. Nogin V.D. Ispozovanie kvantitatsionnoy informatsii o relyatsionnoy vazhnosti kriterii v prinyatie resheniya [Use of quantitative information about the relative importance of criteria in decision making] / V.D. Nogin // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU. – 2000, № 2. S. 89-93.
4. Plokhov I.V., Ilyin A.V., Kozyreva O.I. Struktura i algoritm imitatsionnogo modelirovaniya dinamiki electrofrictionnogo vzaimodeystva / I.V. Plokhov, A.V. Ilyin, O.I. Kozyreva // Vestnik PskovSU. – 2014, № 4. S. 192-199.
5. State Report «On the State of Protection of the Population and the Territory of the Russian Federation from Natural and Man-Made Emergencies in 2020». Moscow: EMERCOM of Russia, FGBU VNII GOCHS (FTS), 2021, 204 s.
6. Romanov, V.N. Tekhnika analiza slozhnykh sistem. St. Petersburg: SZTU. – 2011. 287 s.
7. Klimenkov G.V., Kukor B.L. Ekspertnye sistemy i sistemy situatsionnogo upravleniya na osnove logiko-lingvisticheskikh modeli. Science, Education, Economics. 2017, № 1. S. 7-19.
8. Gulyakina, N.A., Yazyki i tekhnologii programmirovaniya, orientirovannye na obrabotku semanticheskikh setej / N.A. Gulyakina, O.V. Pivovarchik, D.A. Lazurkin // Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektualnykh sistem» [Proc. of the International Scientific and Technical Conference «Open semantic technology of intelligent systems»]. – Minsk: BGUIR publ., 2012 - s. 221-228.
9. Rybina G.V. Ekspertnye sistemy i instrumentalnye sredstva dlya ikh razrabotka: nekotorye itogi [Expert systems and tools for their development: some results]. 2023. T. 21. № 2. Ss. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.18127/j0700814-202302-05>.
10. Muravyov I.I., Ostreikovskiy V.A., Shevchenko E.N. Modeli otsenki faktora vremeni v teorii tekhnogennogo riska dinamicheskikh sistem / I.I. Muravyov, V.A. Ostreikovskiy, E.N. Shevchenko // Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. – 2015. – T. 1. S. 24–27.

**Nikolskiy Oleg Konstantinovich**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of  
Electrical Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: nik37oleg@mail.ru

**Faranosov Vadim Viktorovich**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Postgraduate student, Department of Electrical  
Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: surd1985@mail.ru

**Kulikova Lidiya Vasilievna**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of  
Electrical Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: liliavaskul@gmail.com

**Surinsky Dmitry Olegovich**

State Agrarian University of the Northern Trans-Urals,  
Tyumen,  
Ph.D., Department of Energy Supply of Agriculture  
625003, Tyumen, Respublik st., 7  
Ph.: (3452) 290-103  
E-mail: surd1985@mail.ru

© О.К. Никольский, Л.В. Куликова, В.В. Фараносов, Д.О. Суринский, 2024

УДК 631.171

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-165-172

Л.В. КУЛИКОВА, О.К. НИКОЛЬСКИЙ, Т.М. ХАЛИНА, В.В. ФАРАНОСОВ

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ АНТРОПОГЕННЫМИ РИСКАМИ ОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ОБЪЕКТАХ АПК**

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы диагностирования и управления антропогенными рисками опасности электроустановок на объектах АПК на основе подробного анализа комплексной человеко-машинной системы «Ч-Э-С».

**Ключевые слова:** электроустановка, антропогенные риски, диагностика, управление, человеко-машинная система.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Германенко, В.С. Концептуальные основы управления безопасностью электроустановок зданий / В.С. Германенко // Ползуновский альманах. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2004. – № 1 – 2. – С. 113-120.
2. Карякин, Р.Н. Научные основы концепции электробезопасности электроустановок / Р.Н. Карякин // Электрические станции. – 1999. – №2. – С. 56–66.
3. Гончаренко, Г.А. Математическая модель травмоопасных ситуаций / Г.А. Гончаренко, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. – №8. – С. 198-202.
4. Закон РФ от 21.07.1997 № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». – URL:<http://docs.cntd.ru/document/9046058>.
5. Костюков, А.Ф. Анализ методов диагностики технического состояния ресурса электроустановок / А.Ф. Костюков, О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник АГАУ. – Барнаул, 2014. – № 1. – С. 100-103.
6. Многокритериальная оценка эффективности функционирования сельских электрических сетей 10–0,4 кВ в условиях неопределенности: монография / Под общей редакцией заслуженного деятеля науки и техники, д-ра техн. наук, проф. О.К. Никольского. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 160 с.
7. Никольский, О.К. Теоретические основы техногенных электроустановок потребителей / О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // Вестник ИрГСХА. – Иркутск, 2014. – № 64. – С. 93-102.
8. Черкасова, Н.И. Теоретическое обоснование системы учета, оценки, анализа, прогнозирования интегрального риска электроустановок / Н.И. Черкасова, О.К. Никольский, П.И. Семичевский // Энерго- и ресурсосбережение XXI век: материалы XI международной научно-практической конференции 30 июня 2013 г. – Орёл, Орловский гос. техн. ун-т им. И.С. Тургенева, 2013. – С. 29.
9. Analysis of technogenic risks hazard production facilities using soft computing / O. Nikolsky, N. Vorobyev, L. Kulikova, S. Khomutov // МАТЕС Web- Conf, 106, 07023, (2017), Number of page(s) 9.
10. Никольский, О.К. Моделирование техногенных рисков электроустановок производственных объектов на основе анализа человеко-машинных систем / О.К. Никольский, Ю.Д. Шлионская, И.А. Шаныгин // Электротехника. – 2018. – № 12. – С. 37-44.
11. Kachesova L. Yu. An Expert System for Assessing Technogenic Risks of Electrical Installations Using Temporal Logic / L. Yu. Kachesova and O. K. Nikolsky // Russian Electrical Engineering. – Vol. 89, Ne 12. – P. 681-684.
12. Куликова, Л.В. Основы электромагнитной совместимости: учебник: / Л.В. Куликова, О.К. Никольский, А.А. Сошников. – Изд. 4-е, – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 405 с. ISBN 978-5-4499-1175-9. <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=600138>.
13. Техногенные риски в сельских электрических сетях: монография / О.К. Никольский, Н.П. Воробьев, А.Ф. Костюков и др.]. – Барнаул, 2013.
14. Черкасова, Н.И. Основы и механизмы управления рисками электроустановок объектов АПК / Н.И. Черкасова, А.Ф. Костюков, О.К. Никольский // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2014. – № 4-1. – С. 225-229.
15. Дробязко, О.Н. Методология анализа рисков опасности электроустановок человеко-машинных систем на основе нечетких множеств / О.Н. Дробязко, О.К. Никольский // «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век»: материалы XII международной научно-практической конференции под ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Пилипенко, д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл, Орловский гос. техн. ун-т им. И.С. Тургенева, 2016. – С. 58-64.

**Куликова Лидия Васильевна**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул,  
 Доктор технических наук, профессор,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88  
 E-mail: liliavaskul@gmail.com

**Халина Татьяна Михайловна**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул,  
 Доктор технических наук, профессор,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88  
 E-mail: temf@yandex.ru

**Никольский Олег Константинович**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул,  
 Доктор технических наук, профессор,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88  
 E-mail: nik37oleg@mail.ru

**Фараносов Вадим Викторович**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул,  
 Аспирант,  
 кафедра «Электротехника и автоматизированный электропривод»  
 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
 Тел. (3852) 29-07-88  
 E-mail: surd1985@mail.ru

L.V. KULIKOVA, O.K. NIKOLSKY, T.M. KHALINA, V.V. FARANOSOV

**DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ANTHROPOGENIC  
 HAZARD RISKS OF ELECTRICAL INSTALLATIONS  
 AT AGRICULTURAL FACILITIES**

**Abstract.** *The article discusses the issues of diagnostics and management of anthropogenic hazard risks of electrical installations at agricultural facilities on the basis of a detailed analysis of the integrated human-machine system "H-E-S".*

**Keywords:** *electrical installation, anthropogenic risks, diagnostics, control, human-machine system.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Germanenko V.S. Conceptual foundations of management of the safety of electrical installations of buildings / V.S. Germanenko // Polzunovskiy almanac. – Barnaul: Alt. State Technical University University, 2004. – № 1 – 2. S. 113-120.
2. Karyakin R.N. Scientific foundations of the concept of electrical safety of electrical installations. – 1999. – №2. S. 56–66.
3. Goncharenko G.A., Nikolskiy O.K., Cherkasova N.I. Matematicheskaya model trevoopasnykh situatsii / G.A. Goncharenko, O.K. Nikolskiy, N.I. Cherkasova // Vestnik KrasGAU. Krasnoyarsk, 2013. – №8. S. 198-202.
4. Law of the Russian Federation dated 21.07.1997 No. 116 «On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities». – URL:<http://docs.cntd.ru/document/9046058>.
5. Kostyukov A.F., Nikolskiy O.K., Cherkasova N.I. Analiz metodov diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya resursa elektroustanovki / A.F. Kostyukov, O.K. Nikolskiy, N.I. Cherkasova // Vestnik ASAU. – Barnaul, 2014. – № 1. S. 100-103.
6. Multi-Criteria Assessment of the Efficiency of the Functioning of 10–0.4 kV Rural Electric Networks under Conditions of Uncertainty: Monograph / Under the general editorship of the Honored Worker of Science and Technology, Doctor of Engineering, Doctor of Science, Prof. O.K. Nikolskiy. Novosibirsk: NSTU Publ., 2014. 160 s.
7. Nikolskiy O.K., Cherkasova N.I. Teoreticheskie osnovy tekhnogennykh elektroustanovki potrebnikov. Irkutsk, 2014. – № 64. – S. 93-102.
8. Cherkasova N.I., Nikolskiy O.K., Semichevskiy P.I. Teoreticheskoe osnovaniye sistemy ucheta, otsenki, analiza, prognozirovaniya integralnogo riska elektroustanov / N.I. Cherkasova, O.K. Nikolskiy, P.I. Semichevskiy // Energo- i resursosberezhenie XXI vek: materialy XI mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskoy konferentsii 30 iyunya 2013. – Orel, Orlovskiy gos. tekhn. I.S. Turgenev University, 2013. – s. 29.
9. Analysis of technogenic risks hazard production facilities using soft computing / O. Nikolskiy, N. Vorobyev, L. Kulikova, S. Khomutov // MATEC Web- Conf, 106, 07023, (2017), Number of page(s) 9.
10. Nikolskiy O.K., Shlionskaya Yu.D., Shanygin I.A. Modelirovaniye tekhnogennykh riskov elektroustanovki proizvodstvennykh obektiv na osnove analiza cheloveko-mashinnykh sistem / O.K. Nikolskiy, Yu.D. Shlionskaya, I.A. Shanygin // Elektrotehnika. – 2018. – № 12. – S. 37-44.
11. Kachesova L. Yu. An Expert System for Assessing Technogenic Risks of Electrical Installations Using Temporal Logic / L. Yu. Kachesova and O. K. Nikolskiy // Russian Electrical Engineering. – Vol. 89, № 12. – S. 681-684.
12. Kulikova L.V., Nikolskiy O.K., Soshnikov A.A. Osnovy elektromagnetoj kompatenii: uchebnyk [Fundamentals of electromagnetic compatibility: textbook]. –Ed. 4th, – Moscow; Berlin: Direct Media, 2020. – 405 s. ISBN 978-5-4499-1175-9. <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=600138>.
13. Technogenic Risks in Rural Electric Networks: Monograph / O.K. Nikolskiy, N.P. Vorobyov, A.F. Kostyukov et al.]. – Barnaul, 2013.
14. Cherkasova N.I., Kostyukov A.F., Nikolskiy O.K. Osnovy i mekhanizmy upravleniya riskov elektroustanovki obektiv APK [Fundamentals and mechanisms of risk management of electrical installations of APK objects] / N.I. Cherkasova, A.F. Kostyukov, O.K. Nikolskiy // Polzunovskiy vestnik. – Barnaul, 2014. – № 4-1. – S. 225-229.
15. Drobyazko O.N., Nikolskiy O.K. Methodology of Risk Analysis of Danger of Electrical Installations of Human-Machine Systems Based on Fuzzy Sets / O.N. Drobyazko, O.K. Nikolskiy // Energo- i resursosberezhenie – XXI vek: materialy XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii pod red. Dr. tekhn. Doctor of Engineering, Prof. O.V. Pylypenko, Doctor of Engineering, Doctor of Engineering, Prof. A.N. Kachanova, Doctor of Engineering, Doctor of Science, Prof. Y.S. Stepanova. – Orel, Orlovskiy gos. tekhn. I.S. Turgenev University. 2016. – S. 58-64.

### **Kulikova Lidiya Vasilievna**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of  
Electrical Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: [liliavaskul@gmail.com](mailto:liliavaskul@gmail.com)

### **Khalina Tatyana Mikhailovna**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of  
Electrical Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: [temf@yandex.ru](mailto:temf@yandex.ru)

### **Nikolskiy Oleg Konstantinovich**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of  
Electrical Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: [nik37oleg@mail.ru](mailto:nik37oleg@mail.ru)

### **Faranosov Vadim Viktorovich**

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,  
Postgraduate student, Department of Electrical  
Engineering and Automated Electric Drive  
656038, Barnaul, Lenin Ave., 46  
Ph.: (3852) 29-07-88  
E-mail: [surd1985@mail.ru](mailto:surd1985@mail.ru)

А.Н. КАЧАНОВ, В.А. ГРИШИН

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ В ВАКУУМНО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

**Аннотация.** В статье рассмотрены факторы, влияющие на процесс эффективности сушки древесины в вакуумно-диэлектрической камере (ВДК). В частности, выделено два фактора, а именно, частота источника питания установки и величина воздушного зазора, образуемая между боковыми поверхностями штабеля древесины и поверхностями электродов рабочей камеры ВДК. Исследования, проведенные в программной среде ELCUT, позволили установить степень влияния указанных факторов на характер распределения электромагнитного поля и внутренних источников тепла по сечению штабеля и, как следствие на скорость нагрева.

**Ключевые слова:** вакуумно-диэлектрическая камера, сушка древесины, частота тока источника питания, высокочастотный генератор, воздушный зазор, электроды рабочей камеры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расев А. И. Сушка древесины. – М.: Высшая школа, 1990. – 187 с.
2. Terziev, N. Application of high frequency treatments for improved permeability of Norway spruce (*Piceaabies*KARST.) wood / Terziev N., Daniel G. // Wood the best material for mankind. – Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, 2013. – P. 43–49.
3. Нетушил, А. В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А. В. Нетушил, Б. Я. Жуховицкий, В. Н. Кудин, Е. П. Парини. – М.: Гээнергоиздат, 1958. – 481 с.
4. Княжевская, Г. С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г. С. Княжевская, М. Г. Фирсова, Р. Ш. Килькеев; под ред. А. Н. Шамова. – 2 - е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. – 64 с.
5. Глуханов, Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева / Н.П. Глуханов. – М. – Л.: Машиностроение, 1965. – 80 с.
6. R. Bruner. Die Shnittholzetroknung. 5Auflage// BuchdruckwerkstattenYannoverGmbh. 1987. – 322 s.
7. Дьяконов, К. Ф. Сушка древесины токами высокой частоты / К. Ф. Дьяконов, А. А. Горяев. – М.: «Лесная промышленность», 1981. – 168 с.
8. Leiker, M. Vacuum microwave drying of beech: property profiles and energy efficiency / Leiker M., Adamaska M.A. Guttel R., Mollekoepf N. // 11th International IUFRO Wood Drying Conference. – Skellefteå, Sweden, 2010. – P. 18-22.
9. Качанов, А.Н. Исследование электрического и теплового полей при сушке древесины в вакуумно-диэлектрической камере /А. Н. Качанов, В. А. Гришин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, № 5 (357), ОГУ им. И.С. Тургенева, 2023. – С. 72- 78.
10. Kachanov, A.N. Analysis of factors influencing the parameters of the electromagnetic field in wood during HF drying / A.N. Kachanov, D.A. Korenkov. // Analysis of factors influencing the parameters of the electromagnetic field in wood during HF drying [Электронный ресурс] // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076423/>.
11. Качанов А.Н., Чукумов М.Н. Повышение качества сушки на ПМО “Арай” / Проблемы комплексного развития регионов Казахстана: Материалы международной научно-практической конференции. Часть 1. – Алматы: КазгосИНТИ. 1996, с. 131 – 134.

**Качанов Александр Николаевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
академик АЭН РФ, доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой электрооборудования  
и энергосбережения.  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
тел. 8 (4862) 41 98 53.  
E-mail: kan@ostu.ru

**Гришин Владимир Александрович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
студент группы 21 ЭЭ-м  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29.  
тел. 8 (4862) XX – XX – XX.  
E-mail: grishin29052000@yandex.ru

A.N. KACHANOV, V.A. GRISHIN

## ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF THE WOOD DRYING PROCESS IN A VACUUM-DIELECTRIC CHAMBER

**Abstract.** The article considers the factors influencing the process of wood drying efficiency in a vacuum-dielectric chamber (VDC). In particular, two factors were identified, namely, the frequency of the power supply of the

*installation and the size of the air gap formed between the side surfaces of the wood stack and the surfaces of the electrodes of the VDC working chamber. The studies carried out in the ELCUT software environment allowed us to determine the degree of influence of these factors on the nature of the distribution of the electromagnetic field and internal heat sources along the stack section and, as a consequence, on the heating rate.*

**Keywords:** vacuum-dielectric chamber, wood drying, power supply current frequency, high-frequency generator, air gap, electrodes of the working chamber.

## BIBLIOGRAPHY

1. Rasev A. I. Drying of wood. – M.: Higher school, 1990. – 187 p.
2. Terziev, N. Application of high frequency treatments for improved permeability of Norway spruce (*Picea abies* KARST.) wood / Terziev N., Daniel G. // Wood the best material for mankind. – Arbora Publishers, Zvolen, Slovakia, 2013. – P. 43-49.
3. Netushil, A.V. High-frequency heating dielectrics and semiconductors / A.V. Netushil, B. Ya. Zhukhovitsky, V. N. Kudin, E. P. Parini. – M.: Goenergoizdat, 1958. – 481 p.
4. Knyazhevskaya, G. S. High-frequency heating of dielectric materials / G. S. Knyazhevskaya, M. G. Firsova, R. S. Kilkeev; edited by A. N. Shamov. – 2nd ed., reprint. and additional – L.: Mechanical engineering. Leningr. department, 1989. – 64 p.
5. Glukhanov, N.P. Physical foundations of high-frequency heating / N.P. Glukhanov. – M. – L.: Mechanical engineering, 1965. – 80 p.
6. R. Bruner. Die Shnittholzetroknung. 5Auflage// BuchdruckwerkstattenYannoverGmbh. 1987. – 322 s.
7. Dyakonov, K. F. Drying of wood with high-frequency currents / K. F. Dyakonov, A. A. Goryaev. – M.: "Forest industry", 1981. – 168 p.
8. Leiker, M. Vacuum microwave drying of beech: property profiles and energy efficiency / Leiker M., Adamaska M.A. Guttel R., Mollekopf N. // 11th International IUFRO Wood Drying Conference. – Skellefteå, Sweden, 2010. – P. 18-22.
9. Kachanov, A.N. Investigation of electric and thermal fields during drying of wood in a vacuum-dielectric chamber / A. N. Kachanov, V. A. Grishin // Fundamental and applied problems of engineering and technology, No. 5 (357), I.S. Turgenev OSU, 2023. – pp. 72-78.
10. Kachanov, A.N. Analysis of factors influencing the parameters of the electromagnetic field in wood during HF drying / A.N. Kachanov, D.A. Korenkov. // Analysis of factors influencing the parameters of the electromagnetic field in wood during HF drying [Electronic resource] // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076423/>.
11. Kachanov A.N., Chukumov M.N. Improving the quality of drying at the Arai PMO / Problems of integrated development of the regions of Kazakhstan: Materials of the international scientific and practical conference. Part 1. – Almaty: KazgosINTI. 1996, pp. 131 – 134.

### **Kachanov Alexander Nikolaevich**

FGBOU VO "OSU named after I.S. Turgenev"  
Academician of the AEN of the Russian Federation,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of  
Electrical Equipment and Energy Conservation  
302020, Orel, Naugorskoeshosse, 29  
tel. 8 (4862) 41 98 53.  
E-mail: kan@ostu.ru

### **Grishin Vladimir Aleksandrovich**

FGBOU VO "OSU named after I.S. Turgenev"  
student of group 21 EE-m  
302020, Orel, Naugorskoeshosse, 29  
tel. 8 (4862) XX – XX – XX.  
E-mail: grishin29052000@yandex.ru

© А.Н. Качанов, В.А. Гришин, 2024

УДК 621.311

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-179-184

А.Н. КАЧАНОВ, Е.А. МИРОНОВ

## **ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ**

**Аннотация.** В статье приведены результаты анализа особенностей изготовления и эксплуатации валков прокатных станков, способов упрочнения их рабочей поверхности. Рассмотрены способы термообработки валков и их влияние на физико-химические процессы, происходящие при аустенизации сталей. Обоснована целесообразность применения индукционного нагрева как наиболее эффективного способа бесконтактного подвода тепла в электропроводящую среду и его влияние на качество готовых валков. Предложено техническое решение по использованию установки индукционного нагрева с бегущим электромагнитным полем как средства для повышения энергоэффективности закалки рабочих поверхностей крупногабаритных валков прокатных станков.

**Ключевые слова:** индукционная закалка, непрерывно-последовательный нагрев, валок прокатного стана, бегущее электромагнитное поле, повышение энергоэффективности, аустенизация стали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шепеляковский, К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве / К.З. Шепеляковский. // - М., Машиностроение, 1972. – 288 с.
2. Verhoeven John D. Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist//Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. – P. 211.
3. Геден, М.В. Термическая обработка валков холодной прокатки / М.В.Геден, Г.П. Соболев, И.В. Паисов. – М., Металлургия, 1973. – 344 с.
4. Бердников, А.А. Плазменная закалка сталей – технология машиностроения XXI в./ А.А. Бердников, Г.В. Алисова, М.А. Филиппов [и др.] // Урал индустриальный. Бакунинские чтения. Индустриальная модернизация Урала в XVIII-XXI вв.: материалы XI Всероссийской научной конференции, Екатеринбург, 26-27 сентября 2013 г. – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2013. – Т. 2. – С. 21-26.
5. Гаврилов Г.Н., Костромин С.В., Калинин А.Б., Пейганович В.Н., Ермаков Д.Ю. Лазерные технологии повышения стойкости прокатных валков // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 110-118.
6. Качанов, Н.Н. Прокаливаемость стали / Н.Н. Качанов. - М.: Металлургия, 1978. – 192 с.
7. Пат. № 217585, МПК C21D 9/38, C21D 1/10 «Устройство индукционного нагрева для закалки крупногабаритных валков прокатных станков» / Качанов А.Н. Миронов Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева». – № 2022126467; заявл. 10.10.2022; опубл. 06.04.2023.
8. Качанов А.Н., Миронов Е.А., Селиверстова О.С. Исследование индукционного устройства для нагрева плоских металлических изделий в бегущем электромагнитном поле в программной среде ELCUT // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия технические науки. №3, 2019 – С. 63-67.
9. Качанов А.Н., Миронов Е.А. Результаты исследования электромагнитных сил и мощности тепловыделения в индукционных системах с бегущим электромагнитным полем // Вестник МЭИ. 2023. № 3. С. 55-62. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-55-62.

### Качанов Александр Николаевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»  
д.т.н., профессор, академик АЭН РФ, заведующий кафедрой электрооборудования и энергосбережения  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
тел. 8 (4862) 41 98 53  
e-mail: kan@ostu.ru

### Миронов Евгений Андреевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»  
магистр, ассистент кафедры электрооборудования и энергосбережения  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
тел. 89066612444.  
e-mail: gen996@mail.ru

---

A.N. KACHANOV, N.A. KACHANOV, E.A. MIRONOV

## IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION HARDENING OF ROLLING MILLS LARGE ROLLS

**Abstract.** *The article presents the results of an analysis of the features of the manufacture and operation of rolling mill rolls, and methods for strengthening their working surface. The heat treatment methods of rolls and their influence on the physical and chemical processes occurring during steels austenitization are considered. The feasibility of using induction heating as the most effective method of non-contact heat supply to an electrically conductive medium and its effect on the quality of finished rolls is substantiated. A technical solution has been proposed for the use of an induction heating installation with a traveling electromagnetic field as a means to increase the energy efficiency of hardening the working surfaces of rolling mills large rolls.*

**Keywords:** *induction hardening, scan heating, rolling mill roll, traveling electromagnetic field, increasing energy efficiency, steel austenitization.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Shepelyakovsky, K.Z. Hardening of machine parts by surface hardening during induction heating / K.Z. Shepelyakovsky. // - М., Mechanical Engineering, 1972. – 288 p.
2. Verhoeven John D. Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist//Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. – P. 211.
3. Gedeon, M.V. Heat treatment of cold rolling rolls / M.V. Gideon, G.P. Sobol, I.V. Paisov. – М., Metallurgy, 1973. – 344 p.
4. Berdnikov A.A. Plasma hardening of steels - mechanical engineering technology of the 21st century / A.A. Berdnikov, G.V. Alisova, M.A. Filippov [and others] // Industrial Urals. Bakunin readings. Industrial modernization of



the Urals in the XVIII-XXI centuries: materials of the XI All-Russian Scientific Conference, Ekaterinburg, September 26-27, 2013 - Ekaterinburg: UMC UPI, 2013. - Т. 2. - P. 21-26.

5. Gavrilov G.N., Kostromin S.V., Kalinin A.B., Peiganovich V.N., Ermakov D.Yu. Laser technologies for increasing the durability of rolling rolls // Scientific review. Technical science. – 2014. – No. 1. – P. 110-118.

6. Kachanov, N.N. Hardenability of steel / N.N. Kachanov. - M.: Metallurgy, 1978. – 192 p.

7. Pat. No. 217585, MPK C21D 9/38, C21D 1/10 "Induction heating device for hardening large rolls of rolling mills" / Kachanov A.N. Mironov E.A.; applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "OSU named after. I.S. Turgenev." – No. 2022126467; application 10.10.2022; publ. 04/06/2023.

8. Kachanov A.N., Mironov E.A., Seliverstova O.S. Study of an induction device for heating flat metal products in a traveling electromagnetic field in the ELCUT software environment // Bulletin of Tver State Technical University. Technical science series. No. 3, 2019 – pp. 63-67.

9. Kachanov A.N., Mironov E.A. Results of a study of electromagnetic forces and heat generation power in induction systems with a traveling electromagnetic field // Bulletin of MPEI. 2023. No. 3. P. 55-62. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-55-62.

**Kachanov Alexander Nikolaevich**

FSBEI HE «Oryol State University. I.S. Turgenev»  
Doctor of technical sciences, Professor, Academician of  
the AES RF, Head of the Department of Electrical  
Equipment and Energy Saving  
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29  
tel. 8 (4862) 41 98 53  
e-mail: kan@ostu.ru

**Mironov Eugene Andreevich**

FSBEI HE «Oryol State University. I.S. Turgenev»  
masters degree, assistant at the Department of Electrical  
Equipment and Energy Saving  
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29  
tel. 89066612444.  
e-mail: gen996@mail.ru

© А.Н. Качанов, Е.А. Миронов, 2024

УДК 621.3.048

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-185-192

Ю.Н. СЛОБОДИНА, Ш.Ф. РАХМАНКУЛОВ, О.В. ВОРКУНОВ, М.Ш. ГАРИФУЛЛИН

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ, СОСТАРЕННЫХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**Аннотация.** *Исследовано влияние разрядных процессов в минеральном трансформаторном масле на величину тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ). Получено, что увеличение длительности разрядных процессов приводит к последовательному росту значения  $tg\delta$  масла. Показано, что адсорбционная очистка масел, состаренных под воздействием высоковольтных разрядных процессов, синтетическим силикагелем позволяет восстановить величину  $tg\delta$  до нормируемых значений. При этом эффективность адсорбционной очистки масел, подвергнутым разрядным процессам, оказалась выше, нежели эксплуатационных масел, состаренных под воздействием термоокислительных процессов. Проведено исследование изменения величины  $tg\delta$  от температуры. Получено, что  $tg\delta$  увеличивается с ростом температуры, что характерно для полярных диэлектриков. На основе проведенных исследований сделан вывод, что при разрядных процессах в масле образуются соединения полярного характера, которые могут удаляться с помощью различных адсорбентов.*

**Ключевые слова:** *минеральное трансформаторное масло, высоковольтные разрядные процессы, тангенс угла диэлектрических потерь силикагель, адсорбционная очистка.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Massey, L.G. The Deterioration of Transformer oil / L.G. Massey // Journal of the Institute of Petroleum. – 1952. – vol. 38, №339. – P. 164–171.
2. Козлов, В.К. Механизмы деградации трансформаторных масел / В.К. Козлов, Д.М. Валиуллина, О.А. Туранова, А.Н. Туранов // Электрические станции. – 2022. – № 2. – С. 41–44.
3. Liu, Q. Effect of Oil Regeneration on Improving Paper Conditions in a Distribution Transformer / Q. Liu // Energies. – 2019. – №12. – P. 1665–1671.
4. Митрофанов, Г.А. К вопросу определения влагосодержания и газосодержания жидких диэлектриков / Г.А. Митрофанов, А.А. Еремин, А.М. Кропинов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2000. – № 5–6. – С. 102–107.

5. Липштейн, Р.А. Причины диэлектрических потерь в нефтяном трансформаторном масле при частоте 50 Гц / Р.А. Липштейн, Е.Н. Штерн // Инженерно-физический журнал. – 1960. – № 1. – С. 39–43.
6. Горбунов, Н.И. Повышение эффективности регенерации отработанного масла / Н.И. Горбунов // Весник СевНТУ. – 2011. – С. 159–162.
7. Митрофанов, Г.А. Контроль диэлектрических потерь трансформаторного масла / Г.А. Митрофанов, А.В. Михеев, И.И. Поляков // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2000. – № 5–6. – С. 142–144.
8. Sharin, A.G. A Review on the Reclamation Technologies for Service-Aged Transformer Insulating Oils / A. G. Sharin, A.N. Zulkarnain, A.M. Nor, Z. Hidayat, A.T. Mohd // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – № 10(2). – P. 426–435.
9. Yusupov, D.T. Study of optimal temperature during adsorption cleaning of transformer oil under conditions of long-term operation / D.T. Yusupov, M. Rakhmatova, S. Tashmatova // E3S Web of Conferences. – 2023. – №383. – P. 40–46.
10. Lambe, M.A. Transformer Oil Regeneration as a Panacea for Electric Power Utility Companys Equipment Optimization / M.A. Lambe, S. Kamaldeen, A.A. Ganiyu // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2020. – № 8(2). – P. 2160–2167.
11. Garifullin, M.S. Control of the degradation of the mineral transformer oils hydrocarbon base / M.S. Garifullin, Y.N. Solobodina, A.R. Bikzinurov, R.A. Giniatullin, A.G. Logacheva // E3S Web of Conferences. – 2020. – vol. 216. – P. 49–55.
12. СТО 34.01–23.1–001–2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования // ПАО Россети. – 2017. – 262 с.
13. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов: учебное пособие для вузов. / Б.М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.

**Слободина Юлия Николаевна**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
 магистр, профиль «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»  
 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
 Тел. 8(843) 519-42-72  
 E-mail: yulya\_slobodina@mail.ru

**Рахманкулов Шамиль Фаридович**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
 магистрант, профиль «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность»  
 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
 Тел. 8(843) 519-42-72  
 E-mail: shamil74000@mail.ru

**Воркунов Олег Владимирович**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети»  
 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
 Тел. 8(843) 519-42-72  
 E-mail: vorcunov\_oleg@mail.ru

**Гарифуллин Марсель Шарифьянович**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети»  
 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
 Тел. 8(843) 519-42-72  
 E-mail: g\_marsels@mail.ru

---

YU.N. SLOBODINA, SH.F. RAKHMANKULOV, O.V. VORKUNOV, M.SH. GARIFULLIN

## STUDY OF ADSORPTION CLEANING EFFICIENCY OF TRANSFORMER OILS AGED UNDER THE INFLUENCE OF DISCHARGE PROCESSES

**Abstract.** *The influence of discharge processes in mineral transformer oil on the value of the tangent of dielectric loss angle ( $tg\delta$ ) has been investigated. It was obtained that the increase in the duration of discharge processes leads to a consistent increase in the value of  $tg\delta$  of oil. It is shown that adsorption purification of oils aged under the influence of high-voltage discharge processes with synthetic silica gel allows to restore the value of  $tg\delta$  to the normalized values. At the same time the efficiency of adsorption purification of oils subjected to discharge processes was higher than that of operational oils aged under the influence of thermo-oxidative processes. The study of change of  $tg\delta$  value from temperature was carried out. It was obtained that  $tg\delta$  increases with temperature, which is characteristic for polar dielectrics. On the basis of the conducted researches it is concluded that at discharge processes in oil polar compounds are formed, which can be removed with the help of various adsorbents.*

**Keywords.** *mineral transformer oil, high-voltage discharge processes, dielectric loss tangent of silica gel, adsorption purification.*

BIBLIOGRAPHY

1. Massey, L.G. The Deterioration of Transformer oil / L.G Massey // Journal of the Institute of Petroleum. – 1952. – vol. 38, №339. – P. 164-171.
2. Kozlov, V.K. Mechanisms of transformer oils degradation / V.K. Kozlov, D.M. Valiullina, O.A. Turanova, A.N. Turanov // Electrical power stations. – 2022. – № 2. – С. 41-44.
3. Liu, Q. Effect of Oil Regeneration on Improving Paper Conditions in a Distribution Transformer / Q. Liu. Liu // Energies. – 2019. – №12. – P. 1665-1671.
4. Mitrofanov, G.A. To the question of determining the moisture content and gas content of liquid dielectrics / G.A. Mitrofanov, A.A. Eremin, A.M. Kropinov // Izvestiya vuzov. Problems of Power Engineering. – 2000. – № 5-6. – С. 102-107.
5. Lipshtein, R.A. Causes of dielectric losses in oil transformer oil at a frequency of 50 Hz / R.A. Lipshtein, E.N. Stern // Engineering and Physical Journal. – 1960. – № 1. – С. 39-43.
6. Gorbunov, N.I. Increasing the efficiency of the used oil regeneration / N.I. Gorbunov // Vesnik SevNTU. – 2011. – С. 159-162.
7. Mitrofanov, G.A. Control of the transformer oil dielectric losses / G.A. Mitrofanov, A.V. Mikheev, I.I. Polyakov // Izvestia vuzovia vuzov. Problems of Power Engineering. – 2000. – № 5-6. – С. 142-144.
8. Sharin, A.G. A Review on the Reclamation Technologies for Service-Aged Transformer Insulating Oils / A. G. Sharin, A.N. Zulkarnain, A.M. Nor, Z. Hidayat, A.T. Mohd // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – № 10(2). – P. 426-435.
9. Yusupov, D.T. Study of optimal temperature during adsorption cleaning of transformer oil under conditions of long-term operation / D.T. Yusupov, M. Rakhmatova, S. Tashmatova // E3S Web of Conferences / D.T. Yusupov, M. Rakhmatova, S. Tashmatova // E3S Web of Conferences. – 2023. – № 383. – P. 40-46.
10. Lambe, M.A. Transformer Oil Regeneration as a Panacea for Electric Power Utility Companys Equipment Optimization / M. A. Lambe, S. Kamaldeen, A. A. Ganiyu // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2020. – № 8(2). – P. 2160-2167.
11. Garifullin, M.S. Control of the degradation of the mineral transformer oils hydrocarbon base / M.S. Garifullin, Y.N. Solobodina, A.R. Bikzinurov, R.A. Giniatullin, A.G. Logacheva // E3S Web of Conferences. – 2020. – vol. 216. – P. 49-55.
12. STO 34.01-23.1-001-2017. Scope and norms of testing of electrical equipment // PJSC Russian Grids. – 2017. – 262 с.
13. Tareev, B.M. Physics of dielectric materials: textbook for universities. / B.M. Tareev. – Moscow: Energoizdat, 1982. – 320 с.

**Slobodina Yulia Nikolaevna**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
masters degree, profile "Electric power systems, networks, power transmission, their modes, stability and reliability"  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: yulya\_slobodina@mail.ru

**Vorkunov Oleg Vladimirovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electric Power Systems and Networks".  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066.  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: vorcunov\_oleg@mail.ru

**Rakhmankulov Shamil Faridovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
masters student, profile "Electric power systems, networks, power transmission, their modes, stability and reliability"  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: shamil74000@mail.ru

**Garifullin Marsel Sharifianovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Systems and Networks  
51 Krasnoselskaya St., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia  
Tel. 8(843) 519-42-72  
E-mail: g\_marsels@mail.ru

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

**Аннотация.** В статье выполнен анализ основных причин, влияющих на уровень эффективности потребления электрической энергии как одного из видов энергетических ресурсов на промышленных предприятиях. По результатам проведенного анализа сделано заключение, что уровень эффективности использования электроэнергии на промышленных предприятиях основным и вспомогательными производственными процессами зависит от многих факторов, имеющих внутреннюю и внешнюю природу, значения которых представляются как количественными данными, так и качественными, в том числе и экспертными оценками. Также показана необходимость учета существования в исходной информации неполноты и неопределенности данных, что ограничивает использование классических математических моделей, основанных на составлении и последующем решении систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Для преодоления этих сложностей авторами статьи предложено использовать методы системного анализа и искусственного интеллекта, чтобы создать модель для изучения процессов потребления электроэнергии на промышленных предприятиях. Применение данной модели позволит находить более обоснованную оценку эффективности использования электроэнергии, чем при использовании математических моделей, основанных на работе с информацией, представленной в количественном виде. Показано, что использование в таких моделях нечеткой логики позволяет привлекать для исследования процессы энергопотребления знаний экспертов, а также способствует решению проблемы использования исходной информации, имеющей хотя бы частичную неполноту и неопределенность. Для автоматического формирования знаний с последующим их применением в механизме нечеткого логического вывода использована нечеткая нейронная сеть.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, нейронная сеть, электроэнергия, математическая модель, нечёткая логика, потребление электроэнергии, базы знаний.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации (Государственное задание «Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем», проект № 0851-2020-0032).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев К.А. Влияние процессов энергосбережения и повышения энергоэффективности на инновационное развитие национальных экономик // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. Вып. 1. С. 82–92. doi: 10.24891/ea.16.1.82.
2. Лебедев В.А. Экспертный метод оценки энергоэффективности оборудования систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т.219. С. 435–443. doi: 10.18454/PMI.2016.3.435.
3. Мельник А.Н., Ермолаев К.А. Концептуальные основы управления энергосбережением и повышением энергоэффективности на промышленном предприятии в условиях его инновационного развития // Экономический анализ: теория и практика. 2019. Т. 18, № 1. С. 22–39. doi: 10.24891/ea.18.1.22.
4. Кокшаров В.А. Методический подход оценки приоритетов энергетической политики промышленного предприятия // Статистика и Экономика. 2015. № 2. С. 72–77. doi: 10.21686/2500-3925-2015-2-72-77.
5. Макаркин Н.П., Горина А.П., Алферина О.Н. и др. Эффективность использования ресурсного потенциала предприятия: методика оценки // Фундаментальные исследования. 2019. № 11. С. 89–94. doi: 10.17513/ft.42592.
6. Криворотов В. В., Калина А. В., Савельева А. И. Оценка энергоэффективности компаний медной промышленности: теория и практика // Известия Уральского государственного экономического университета. 2018. Т. 19, № 4. С. 107–116. doi: 10.29141/2073-1019-2018-19-5-8.
7. Cornelis Marine. Energy efficiency, the overlooked climate emergency solution // Экономическая политика. 2020. Т. 15. № 2. С. 48–67. doi: 10.18288/1994-5124-2020-2-48-67.
8. Koronen, C., Åhman, M., Nilsson, L.J. Data centres in future European energy systems-energy efficiency, integration and policy. Energy Efficiency 13, pp. 129–144, 2020. doi: 10.1007/s12053-019-09833-8.
9. Кокшаров В.А. Систематизация факторов энергоэффективности промышленного предприятия // Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика». 2016. № 1(28). С. 147–156.
10. Шаталова, О.М. Об использовании нечетких вычислений в решении проблемы неопределенности при оценке эффективности технологических инноваций на предприятии // Вестник ЮУрГУ. Экономика и менеджмент. 2018. Т. 12, № 3. С. 83–91. doi: 10.14529/em180309.
11. Шаталова, О.М. Основные положения методики информационного обеспечения в оценке эффективности технологических инноваций методами нечеткого моделирования // Вестник ЮУрГУ. Экономика и менеджмент. 2018. Т. 12, № 4. С. 102–112. doi: 10.14529/em180413.
12. Леденева Т. М., Решетников А.Д. Особенности реализации механизма нечеткого логического вывода в нечетких системах // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108) Часть 1. С. 107–117. doi: 10.23670/IRJ.2021.108.6.018
13. Голосовский М.С., Богомолов А.В., Терехов Д.С., и др. Алгоритм настройки системы нечёткого логического вывода типа Мамдани // Вестник ЮУрГУ. Математика. Механика. Физика. 2018. №3. С. 19–29. doi: 10.14529/mmp180303.

14. Шилова С.В., Бурмистрова О.Н. Композиция Мамдани в моделях нечеткого анализа как нечеткий аналог подстановок зависимостей // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 10. С. 102-107. doi: 10.17513/snt.38861.

15. Segismundo S. I., Luis R. Mamdani fuzzy systems for modeling and simulation: a critical assessment // SSR. 2017. Vol. 21(3). doi: 10.2139/ssrn.2900827.

16. Zulfikar W.B., Jumadi, Prasetyo P.K., Ramdhani M.A. Implementation of Mamdani Fuzzy Method in Employee Promotion System. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 288. doi: 10.1088/1757-899X/288/1/012147.

17. Dwi Fibriayora A. A. I., Gandhiadi G. K., Tastrawati N. K. T., Eka N. Kencana. Application of Mamdani fuzzy method to determine round bread production at pt Vanessa bakery. E-Jurnal Matematika. 2019. Vol. 8(3), pp. 204-210. doi: 10.24843/MTK.2019.v08.i03.p254/.

18. Нгуен Данг Минь. Влияние обучающих выборок на процесс обучения адаптивных нейро-нечётких сетей для решения задачи классификации деталей // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. № 4 (11) Часть 1. С. 106-110. doi: 10.18454/IRJ.2227-6017.

19. Саенко И. Б., Скорик Ф. А., Котенко И. В. Мониторинг и прогнозирование состояния компьютерных сетей на основе применения гибридных нейронных сетей // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59/ № 10. С. 795-800. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-795-800.

20. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.

**Бирюлин Владимир Иванович**  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроснабжения  
г. Курск, ул. Союзная, 69б-36  
89036391510  
bir1956@mail.ru

**Куделина Дарья Васильевна**  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет»  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроснабжения  
г. Курск, ул. Щепкина, 11-141  
89207300883  
mary\_joy@mail.ru

---

V.I. BIRYULIN, D.V. KUDELINA

## **APPLICATION OF FUZZY NEURAL NETWORKS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE ELECTRICITY USE IN INDUSTRIAL ENTERPRISES**

**Abstract.** *The article analyzes the main reasons which affect the level of electric energy efficiency consumption as one of the energy resources types in industrial enterprises. Based on the results of the analysis, it was concluded that the efficiency level in the electricity use in industrial enterprises by the main and auxiliary production processes depends on many factors of internal and external nature, the values of which are represented both by quantitative data and qualitative ones, including expert assessments. It also shows the need to take into account the existence of incompleteness and uncertainty in the initial information, which limits the use of classical mathematical models based on the compilation and subsequent solution of algebraic and differential equations systems. To overcome these difficulties, the authors of the article proposed to use the methods of system analysis and artificial intelligence to create a model for studying the processes of electricity consumption in industrial enterprises. The use of this model will make it possible to find a more reasonable assessment of electricity efficiency using. Mathematical models are based on working with information presented in a quantitative form. It is shown that the use of fuzzy logic in such models makes it possible to involve expert knowledge in the study of energy consumption processes, and also contributes to solving the problem of using initial information which has at least partial incompleteness and uncertainty. A fuzzy neural network was used to generate automatically knowledge with its subsequent application in the fuzzy inference mechanism.*

**Keywords:** *energy efficiency, neural network, electricity, mathematical model, fuzzy logic, electricity consumption, knowledge bases.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Yermolayev K.A. Vliyaniye protsessov energosberezheniya i povysheniya energoeffektivnosti na innovatsionnoye razvitiye natsionalnykh ekonomik // Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2017. T. 16. Vyp. 1. S. 82–92. doi: 10.24891/ea.16.1.82.

2. Lebedev V.A. Eksergeticheskii metod otsenki energoeffektivnosti oborudovaniya sistem energoobespecheniya predpriyatiy mineralno-syryevogo kompleksa // Zapiski Gornogo instituta. 2016. T.219. S. 435–443. doi: 10.18454/PMI.2016.3.435.

3. Melnik A.N., Yermolayev K.A. Kontseptualnyye osnovy upravleniya energosberezheniyem i povysheniyem energoeffektivnosti na promyshlennom predpriyatii v usloviyakh yego innovatsionnogo razvitiya // Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2019. T. 18, № 1. S. 22–39. doi: 10.24891/ea.18.1.22.

4. Koksharov V.A. Metodicheskii podkhod otsenki prioritetov energeticheskoy politiki promyshlennogo predpriyatiya // Statistika i Ekonomika. 2015. № 2. S. 72–77. doi: 10.21686/2500-3925-2015-2-72-77.

5. Makarkin N.P., Gorina A.P., Alferina O.N. i dr. Effektivnost ispolzovaniya resursnogo potentsiala predpriyatiya: metodika otsenki // Fundamentalnyye issledovaniya. 2019. № 11. S. 89-94. doi: 10.17513/fr.42592.

6. Krivorotov V. V., Kalina A. V., Savelyeva A. I. Otsenka energoeffektivnosti kompaniy mednov promyshlennosti: teoriya i praktika // Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. 2018. T. 19, № 4. S. 107–116. doi: 10.29141/2073 1019 2018 19 5 8.
7. Cornelis Marine. Energy efficiency, the overlooked climate emergency solution // Ekonomicheskaya politika. 2020. T. 15. № 2. S. 48–67. doi: 10.18288/1994-5124-2020-2-48-67.
8. Koronen, C., Åhman, M., Nilsson, L.J. Data centres in future European energy systems-energy efficiency, integration and policy. Energy Efficiency 13, pp. 129–144, 2020. doi: 10.1007/s12053-019-09833-8.
9. Koksharov V.A. Sistematizatsiya faktorov energoeffektivnosti promyshlennogo predpriyatiya // Vestnik Permskogo universiteta. Ser. «Ekonomika». 2016. № 1(28). S. 147–156.
10. Shatalova, O.M. Ob ispolzovanii nechetkikh vychisleniy v reshenii problemy neopredelennosti pri otsenke effektivnosti tekhnologicheskikh innovatsiy na predpriyatii // Vestnik YUUrGU. Ekonomika i menedzhment. 2018. T. 12, № 3. S. 83–91. doi: 10.14529/em180309.
11. Shatalova, O.M. Osnovnyye polozheniya metodiki informatsionnogo obespecheniya v otsenke effektivnosti tekhnologicheskikh innovatsiy metodami nechetkogo modelirovaniya // Vestnik YUUrGU. Ekonomika i menedzhment. 2018. T. 12, № 4. S. 102–112. doi: 10.14529/em180413.
12. Ledeneva T. M., Reshetnikov A.D. Osobennosti realizatsii mekhanizma nechetkogo logicheskogo vyvoda v nechetkikh sistemakh // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2021. № 6 (108) Chast 1. S. 107–117. doi: 10.23670/IRJ.2021.108.6.018
13. Golosovskiy M.S., Bogomolov A.V., Terebov D.S., i dr. Algoritm nastroyki sistemy nechetkogo logicheskogo vyvoda tipa Mamdani // Vestnik YUUrGU. Matematika. Mekhanika. Fizika. 2018. №3. С. 19–29. doi: 10.14529/mmp180303.
14. Shilova S.V., Burmistrova O.N. Kompozitsiya Mamdani v modelyakh nechetkogo analiza kak nechetkiy analog podstanovok zavisimostey // Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii. 2021. № 10. S. 102-107. doi: 10.17513/snt.38861.
15. Segismundo S. I., Luis R. Mamdani fuzzy systems for modeling and simulation: a critical assessment // SSR. 2017. Vol. 21(3). doi: 10.2139/ssrn.2900827.
16. Zulfikar W.B., Jumadi, Prasetyo P.K., Ramdhani M.A. Implementation of Mamdani Fuzzy Method in Employee Promotion System. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 288. doi: 10.1088/1757-899X/288/1/012147.
17. Dwi Fibriayora A. A. I., Gandhiadi G. K., Tastrawati N. K. T., Eka N. Kencana. Application of Mamdani fuzzy method to determine round bread production at pt Vanessa bakery. E-Jurnal Matematika. 2019. Vol. 8(3), pp. 204-210. doi: 10.24843/MTK.2019.v08.i03.p254/.
18. Nguven Dang Min. Vliyaniye obuchayushchikh vyborok na protsess obucheniya adaptivnykh nevro-nechotkikh setey dlya resheniya zadachi klassifikatsii detaley // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2013. № 4 (11) Chast 1. S. 106-110. doi: 10.18454/IRJ.2227-6017.
19. Sayenko I. B., Skorik F. A., Kotenko I. V. Monitoring i prognozirovaniye sostoyaniya kompyuternykh setey na osnove primeneniya gibridnykh neyronnykh setey // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. T. 59/ № 10. S. 795-800. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-10-795-800.
20. Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennyye neyronnyye seti. Teoriya i praktika. 2-ye izd., stereotip. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2002. 382 s.

**Biryulin Vladimir Ivanovich**  
 FGBOU VO «Southwest State University»  
 Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
 Associate Professor of the Power Supply Department,  
 Kursk, st. Soyuznaya, 69b-36  
 89036391510  
 bir1956@mail.ru

**Kudelina Daria Vasilievna**  
 FGBOU VO «Southwest State University»  
 Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
 Associate Professor of the Power Supply Department,  
 Kursk, st. Shchepkina, 11-141  
 89207300883  
 mary\_joy@mail.ru

© В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, 2024

УДК 621.316.9

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-200-205

В.А. ЧЕРНЫШОВ, Г.В. ЛУКЪЯНОВ, Т.Г. КОРОЛЕВА

## СПОСОБ ПЕРЕВОДА РАЗНЕСЕННОГО ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ОДНОФАЗНОЕ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 кВ

**Аннотация.** *Анализируются основные проблемы, мешающие эффективному функционированию воздушных электрических сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Представлен критический анализ их технического состояния и применяемых методов идентификации однофазных повреждений изоляции. Рассматривается специфика работы нового схемотехнического решение, направленного на обеспечение бесперебойной работы данных сетей, за счет перевода двойных замыканий на землю в однофазные.*

**Ключевые слова:** воздушная электрическая сеть 6-10 кВ с изолированной нейтралью; однофазное замыкание на землю; перенапряжение, двойное замыкание на землю; надежность электроснабжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барг, И.Г. Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надежности / И.Г. Барг, В.И. Эдельман. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 258 с
2. Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития / под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательство МЭИ, 2019. – 300 с.
3. Набатов, К.А. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств: учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с.
4. Арбузов, Р.С. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи / Р.С. Арбузов, А.Г. Овсянников. – Новосибирск: Наука, 2009. – 135 с.
5. Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Последняя редакция. – М.: ЦЕНТРМАГ, 2022. – 388 с.
6. Медведева М.Л. Анализ и прогноз аварийности распределительных сетей и электроприемников 6-10 кВ / М.Л. Медведева, С.В. Кузьмин, И.С. Кузьмин, В.Д. Шманев // Надежность и безопасность энергетики, №2. – 2017. – С. 120-125.
7. Баратин Д.С., Берсенин А.П. Корпоративный журнал АО «Системный оператор Единой энергетической системы», №3-4. – 2021. – С. 5-16.
8. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Анализ технического состояния электрооборудования распределительных сетей напряжением 6-10 кВ АПК // Успехи современной науки и образования. 2017. Т. 1. №1. С. 97-102.
9. Королева, Т.Г. Методы повышения эффективности развития системы электроснабжения / Т.Г. Королева, М.М. Мишин // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: материалы XIV международной научно-практической интернет-конференции // Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2016. – С.51-54. – 282 с.
10. Королева Т.Г. О коэффициенте полезного действия трансформатора за пределами нормативного срока эксплуатации / Т.Г. Королева // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: Сборник материалов V международной научно-практической Интернет-конференции. – Орёл: ООО «Издательский дом «ОРЛИК» и К», 2007, С. 132 - 135
11. Королева, Т.Г. Способы решения проблем качества электрической энергии бытовых потребителей / Т.Г. Королева // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: материалы XV международной научно-практической интернет-конференции / Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2017. – 276 с., С.41-44.
12. Королева, Т.Г. Поведение дифференциальных защит при последовательных коммутациях / Т.Г. Королева, С.Н. Кургузова // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: Сборник материалов V народной научно-практической Интернет-конференции. – Орёл: ООО «Издательский дом «ОРЛИК» и К», 2007, С. 129 – 131
13. «Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью», заявка на изобретение № 2022133610 от 20.12.2022; заявитель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.Тургенева». Авторы: Качанов А.Н., Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С.

**Чернышов Вадим Алексеевич**  
ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орёл, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29  
Тел. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: blackseam78@mail.ru

**Лукьянов Геннадий Владимирович**  
ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орёл, магистрант 2 курса, направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
302020 г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29  
Тел. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: lukyanov220@mail.ru

**Королева Татьяна Геннадьевна**  
ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева", г. Орёл, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29  
Тел. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: tgoroleva@mail.ru

---

V.A. CHERNYSHOV, G.V. LUKYANOV, T.G. KOROLEVA

## METHOD FOR CONVERTING A SPACED DOUBLE GROUND FAULT TO A SINGLE PHASE IN NETWORKS WITH AN ISOLATED NEUTRAL VOLTAGE OF 6-10 kV

**Abstract.** The main problems that interfere with the effective functioning of 6-10 kV overhead electrical networks with an isolated neutral are analyzed. A critical analysis of their technical condition and the applied methods for

identifying single-phase insulation faults is presented. The specifics of the operation of a new circuit solution aimed at ensuring uninterrupted operation of these networks by converting double ground faults into single-phase ones are considered.

**Keywords:** overhead electrical network 6-10 kV with insulated neutral; single-phase ground fault; overvoltage, double ground fault; reliability of power supply.

## BIBLIOGRAPHY

1. Barg, I.G. Overhead power transmission lines: Issues of operation and reliability / I.G., Barg, V.I. Edelman. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 258 p.
2. Digital energy: a new paradigm of functioning and development / edited by N.D. Rogalev. – M.: Publishing House of MEL, 2019. – 300 p.
3. Nabatov, K.A. High-voltage vacuum circuit breakers of switchgear: a textbook / K.A. Nabatov, V.V. Afonin. – Tambov: Publishing house of GOU VPO TSTU, 2010. – 96 p.
4. Arbuzov, R.S. Modern methods of diagnostics of overhead power transmission lines / R.S. Arbuzov, A.G. Ovsyannikov. – Novosibirsk: Nauka, 2009. – 135 p.
5. Rules for the organization of maintenance and repair of electric power facilities. The latest edition. – Moscow: TSENTRMAG, 2022. – 388 p.
6. Medvedeva M.L. Analysis and forecast of accidents of distribution networks and electric receivers of 6-10 kV / M.L. Medvedeva, S.V. Kuzmin, I.S. Kuzmin, V.D. Shmanev // Reliability and safety of power engineering, No. 2. – 2017. – pp. 120-125.
7. Baratin D.S., Bersenin A.P. Corporate journal of JSC "System Operator of the Unified Energy System", No.3-4. – 2021. – pp. 5-16.
8. Sazykin V.G., Kudryakov A.G. Analysis of the technical condition of electrical equipment of distribution networks with a voltage of 6-10 kV AIC // Successes of modern science and education. 2017. Vol. 1. No. 1. pp. 97-102.
9. Koroleva, T.G. Methods for increasing the efficiency of development of the power supply system / T.G. Koroleva, M.M. Mishin // Energy and resource saving - XXI century: materials of the XIV international scientific and practical Internet conference // Orel: OSU named after. I.S. Turgeneva, 2016. – P.51-54. – 282 p.
10. Koroleva T.G. On the efficiency of a transformer beyond the standard service life / T.G. Koroleva // Energy and resource saving - XXI century: Collection of materials of the V international scientific and practical Internet conference. – Orel: LLC Publishing House ORLIK and K, 2007, pp. 132 - 135
11. Koroleva, T.G. Methods for solving problems of quality of electrical energy of household consumers / T.G. Koroleva // Energy and resource saving - XXI century: materials of the XV international scientific and practical Internet conference / Orel: OSU named after. I.S. Turgeneva, 2017. – 276 pp., pp. 41-44.
12. Koroleva, T.G. Behavior of differential protections during sequential switchings / T.G. Koroleva, S.N. Kurguzova // Energy and resource saving - XXI century: Collection of materials of the V Peoples Scientific and Practical Internet Conference. – Orel: LLC Publishing House ORLIK and K, 2007, pp. 129 – 131
13. "A method for converting a spaced double earth fault into a single-phase one in networks with an isolated neutral", application for invention No. 2022133610 dated 12/20/2022; applicant of the I.S.Turgenov OSU. Authors: Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Darov A.S.

**Chernyshov Vadim Alekseevich**  
FGBOU VO "OSU named after  
I.S. Turgenov", Orel,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Associate  
Professor of the Department of  
Electrical Equipment and Energy  
Saving  
302020, Orel, Naugorskoe  
highway, 29  
Tel. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: blackseam78@mail.ru

**Lukyanov Gennady Vladimirovich**  
FGBOU VO "OSU named after I.S.  
Turgenov", Orel,  
2nd year masters student, area of  
training 04.13.02 "Electrical power  
engineering and electrical  
engineering"  
302020 Orel, Naugorskoe highway,  
29  
Tel. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: lukyanov220@mail.ru

**Koroleva Tatyana Gennadievna**  
FGBOU VO "OSU named after I.S.  
Turgenov", Orel,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Associate  
Professor of the Department of  
Electrical Equipment and Energy  
Saving  
302020, Orel, Naugorskoe highway,  
29  
Tel. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: tgoroleva@mail.ru

© В.А. Чернышов, Г.В. Лукьянов, Т.Г. Королева, 2024



*Адрес издателя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
Тел. (4862) 75–13–18  
<http://oreluniver.ru>  
E-mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

*Адрес редакции:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская область, г. Орёл, ул. Московская, 34  
+7 (905) 169 88 99

<https://oreluniver.ru/science/journal/fipptt>  
E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 28.02.2024 г.  
Дата выхода в свет 26.03.2024 г.  
Формат 70X108/16. Усл. печ. л. 12,875  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ № 84

Отпечатано с готового оригинал–макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, Орловская область, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95