

ISSN 2073-7408

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

1 (363) 2024

Редколлегия

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 редколлегий:

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)
Запозель Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)
Зубчиных 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)
Пылишенко 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)
Содяткин 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/fippt>
E-mail: radstu@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-rg.ru и 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.

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 многослойных 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 триботронных опор роторов 52
Сытин А.В., Внуков С.С., Серебряников 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., Агайков 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 резиннометаллических шарниров на высокоскоростном подвижном составе..... 96

Приборы, биотехнические системы и технологии

Гасанова В.А., Пушкарёва А.В. Разработка алгоритма сжатия и передачи данных ЭКГ аритмии 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., Сурицкий 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. Диагностика 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, состаренных 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 нейтралью 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. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки), 2.5.7. Технологии 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)

Smolenzev 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

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-rf.ru

and 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

Machin-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., Uglava 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, φ – 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.

Введение

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 [1-4]. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача.

Теоретическое обоснование

Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной [5-7], на валу которой закреплен супермаховик.

При подключении машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый следующими выражениями [8, 9].

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U \end{cases},$$

где J – момент инерции супермаховика в совокупности с собственным моментом инерции электрической машины,

φ – угловое положение ротора,

k – коэффициент вязкого трения,

B – значение магнитной индукции [10],

$2l$ – рабочая длина витка якорной обмотки,

w – число витков якорной обмотки,

D – диаметр якоря,

R – активное сопротивление электрической цепи,

U – напряжение источника питания.

Для компактности вводится обозначение

$$Bl\omega D = Y. \quad (1)$$

Очевидные начальные условия

$$\varphi(0) = \varphi_0, \quad \frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0. \quad (2)$$

Из второго выражения системы уравнений вытекает

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{R}{Y}i + \frac{U}{Y}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{R}{Y}\frac{di}{dt}.$$

При подстановке в первое выражение системы уравнений получается

$$-\frac{JR}{Y}\frac{di}{dt} - \frac{kR}{Y}i + \frac{kU}{Y} = Yi,$$

$$\frac{di}{dt} + \left(\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J}\right)i = \frac{kU}{JR}.$$

Для компактности вводятся обозначения

$$\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} = A,$$

$$\frac{kU}{JR} = B.$$

В соответствии с этим

$$\frac{di}{dt} + Ai = B. \quad (4)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$i_1 = C_1 e^{-At}.$$

Частное решение –

$$i_2 = C_2.$$

Из этого в сочетании с (4) следует

$$0 + AC_2 = B,$$

$$C_2 = \frac{B}{A}.$$

Ток в цепи имеет вид:

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (5)$$

Имея в виду (2) и (3),

$$i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R}.$$

Из этого в сочетании с (5) следует

$$C_1 = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}.$$

$$i = \left(\frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A}\right)e^{-At} + \frac{B}{A}.$$

$$i = \left(\frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R}\right)e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} =$$

$$= \left(\frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R}\right)e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}. \quad (6)$$

где $E_0 = Y\omega_0$.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} =$$

$$= \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \quad (7)$$

Если $k = 0$, $R_k = \infty$, то

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (9)$$

Выражения (8), (9) повторяют соотношения для зарядки электрического конденсатора. Если соединить между собой концы якорной обмотки, то

$$i = \frac{-E_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Это выражение повторяет соотношение для разрядки электрического конденсатора.

Обсуждение

Из формул 6) – (9) 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, которая равна

$$C_J = \frac{J}{Y^2}.$$

Кроме того, возникает искусственное электрическое сопротивление (которое не связано с удельным сопротивлением, длиной и площадью сечения проводников)

$$R_k = \frac{Y^2}{k}.$$

Аккумулятор механической энергии накапливает энергию

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{JU^2}{2Y^2} = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Эквивалентная электрическая схема аккумулятора механической энергии представлена на рисунке 1.

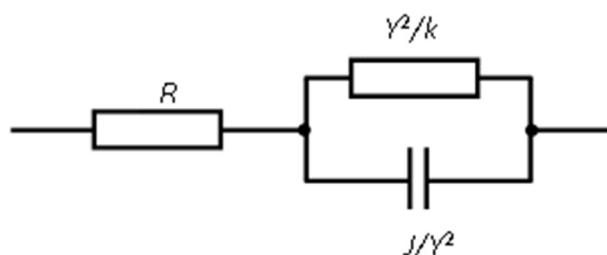


Рисунок 1 - Электрическая схема аккумулятора механической энергии

На рисунке 2 показан график тока зарядки/разрядки искусственной электрической емкости.

В связи с изложенным аккумулятор механической энергии можно трактовать как искусственный электрический конденсатор, который запасает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

Заключение

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.

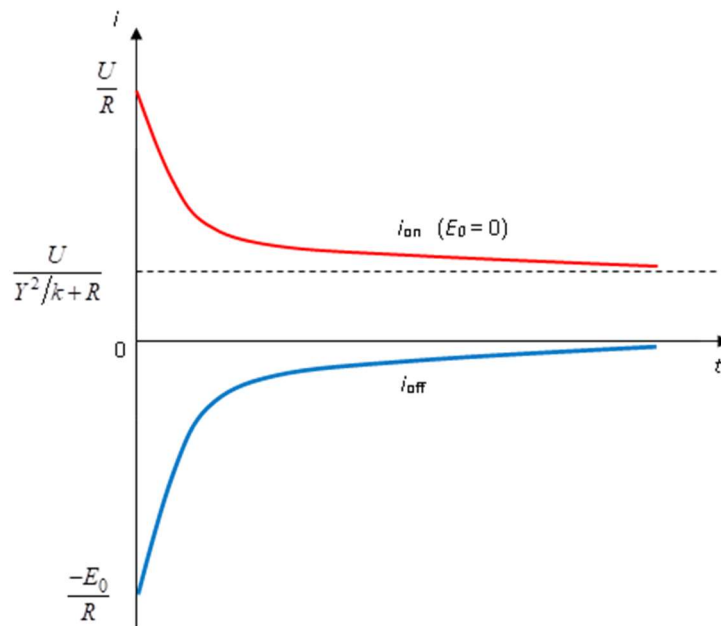


Рисунок 2 - Характер тока при зарядке и разрядке искусственной электрической емкости

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

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, φ - 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 BG TU: mekhat. 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

pavlov.val.75@mail.ru

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, износостойкая задача, переменная вертикальная нагрузка.

Введение

Миниатюрные опоры являются распространёнными и важными узлами многих приборов (часов, гироскопов, акселерометров, электрических счетчиков и т.д.). Они часто определяют выходные параметры и надежность функционирования этих устройств. Камневые опоры, составляющие специфическую группу узлов трения, применяются в наиболее ответственных прецизионных приборах. Главные преимущества таких опор состоят в их высокой износостойкости и стабильности фрикционных характеристик [1].

Областью применения каменных опор помимо измерительных приборов [2, 3] являются разнообразные роторные системы и кинетические накопители энергии [4, 5]. На номинальных режимах работы таких устройств скорость вращения иглы относительно основания составляет $10^2 \dots 10^3$ оборотов в секунду, при этом срок службы может достигать нескольких десятков лет. В таких условиях изнашивание контактных поверхностей может вносить существенный вклад в функционирование всего изделия.

Эффективным методом оценки работоспособности контактной пары, работающей в условиях изнашивания поверхностей, может быть численное моделирование, включающее в себя решение износостойкой задачи, которая состоит в расчёте эволюции износа и контактного давления при изнашивании пары трения. Решение износостойкой задачи можно рассматривать как решение контактной задачи в каждый момент времени для тел, форма которых изменяется вследствие износа. В качестве эволюционного уравнения здесь выступает закон изнашивания, связывающий скорость износа с контактными характеристиками: контактным давлением, скоростью скольжения и др.

Основу износостойкой задачи составляют теория контактного взаимодействия деформируемых тел и область трибологии, связанная с теоретико-экспериментальными исследованиями закономерностей изнашивания [6]. Под изнашиванием обычно понимается процесс постепенного удаления материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при механическом воздействии на него другого тела или среды. Изнашивание проявляется в постепенном изменении размеров тела и количественно характеризуется величиной износа w , при этом различают линейный, массовый и объемный износы [7, 8].

В настоящее время наиболее распространена следующая классификация видов износа [9, 10]:

- абразивный, имеющий место в контакте двух тел с существенно различающимися твердостями или при наличии в промежуточной среде твердых частиц;
- адгезионный, имеющий место в контактах между телами, твердость которых одинакова или имеет один и тот же порядок;
- коррозионный, связанный с химической модификацией поверхности с последующим удалением поверхностного слоя;
- усталостный, возникающий при неоднократном нагружении поверхности в процессе скольжения или качения, так что каждый отдельный цикл нагружения не приводит к заметным изменениям поверхности.

Основная часть

Известно более трехсот моделей, описывающих процесс изнашивания при контактном взаимодействии [11]. В данной работе мы будем рассматривать адгезионный износ поверхностей, а для его описания использовать модель Арчарда [12...14]:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} p^n v^m \tag{1}$$

где w – величина линейного износа поверхности;
 K – безразмерный коэффициент износа;
 H – твердость поверхности;
 p – контактное давление;
 v – скорость относительного сдвига контактирующих поверхностей;
 n и m – показатели степеней.

Коэффициент износа является мерой оценки величины износа материала [15]. Для различных материалов при разных режимах трения и в зависимости от присутствия в контакте смазочных материалов, коэффициент износа может изменяться в широком диапазоне от 10^{-14} до 10^{-1} [16].

Твердость материала – одно из механических свойств, часто используемых в трибологии, показатель стойкости к локализованной пластической деформации [17].

Уравнение (1) предполагает вычисление относительной сдвиговой скорости в каждой точке контактной поверхности. Для быстровращающейся опорной пары, совершающей за жизненный цикл порядка $10^9 \dots 10^{12}$ оборотов (в зависимости от скорости вращения и срока службы) моделирование процесса изнашивания в явной постановке не представляется возможным. При этом, учитывая квазистационарность процесса изнашивания, возможно уравнение (1) записать в следующем виде:

$$\Delta w_{(i)} = \frac{K}{H} p_{(i)}^n (r \tilde{\omega}_{(i)})^m \Delta t_{(i)} \tag{2}$$

где $\Delta w_{(i)}$ – приращение величины износа на i -й итерации;
 $\Delta t_{(i)}$ – инкремент, соответствующий i -й итерации;
 $\tilde{\omega}_{(i)}$ – угловая скорость, соотносящаяся с количеством оборотов, моделируемым в рамках текущей итерации следующим соотношением:

$$\tilde{\omega}_{(i)} = 2\pi \frac{\Delta N_{(i)}}{\Delta t_{(i)}} \tag{3}$$

Таким образом, моделирование процесса изнашивания осесимметричной контактной пары может быть выполнено в стационарной постановке [18...22].

Будем рассматривать процесс изнашивания опорной пары, в которой игла вращается с постоянной угловой скоростью ω относительно опоры, при этом на неё действует вертикальная сила F , совпадающая по направлению с осью симметрии опорной пары; амплитуда силы является переменной во времени и изменяющейся по квазипериодическому закону. Изменение амплитуды силы во времени может быть связано, например, с колебательными процессами, проходящими в системе [23...25].

Также будем предполагать линейный закон изнашивания, когда в (1) и (2) показатели степеней m и n равны 1.0.

Величина линейного износа, накопленного за время t в точке контактной поверхности с радиальной координатой r , будет равняться:

$$w(r, t) = \int_0^t \frac{K}{H} p r \omega dt \tag{4}$$

В качестве результата моделирования будем рассматривать величину объемного износа, вычисляемую как:

$$W = \int_A w dA \tag{5}$$

где A – площадь контактной поверхности.
 В осесимметричном случае площадь бесконечно малого участка поверхности может быть вычислена как:

$$dA = 2\pi\rho d\rho \quad (6)$$

Учет изменения контактной площади вследствие изнашивания в общем виде, как это показано на рисунке 1, является весьма нетривиальной задачей, поскольку (5) сводится к вычислению выражения:

$$W = 2\pi \int_{r_1(t)}^{r_2(t)} w(\rho, t)\rho d\rho \quad (7)$$

где $r_1(t), r_2(t)$ – зависящие от формы поверхности и переменные во времени радиальные координаты границ области контактного взаимодействия.

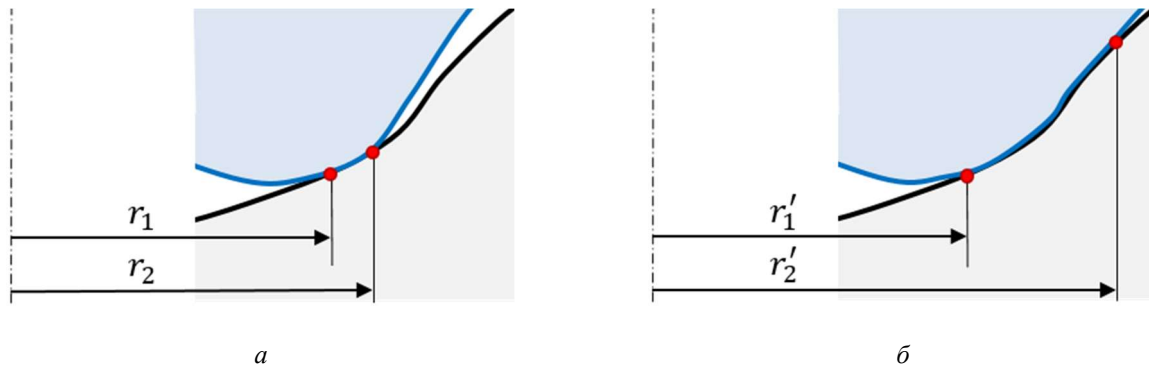


Рисунок 1 – Изменение координат границ контактной поверхности в процессе изнашивания
а – в начальный момент времени; б – после изнашивания

Если предположить, что за рассматриваемый промежуток времени изменением формы и размера контактной поверхности можно пренебречь, а также что свойства контактирующих материалов не изменяются в процессе изнашивания, то (5) можно переписать в виде:

$$w(r, t) = \frac{K}{H} r \omega \int_0^t p(r, \tau) d\tau \quad (8)$$

Основываясь на зависимостях, описывающих распределение контактного давления, полученных для простых геометрических случаев (коническая и сферическая поверхности) [26], можно сделать вывод, что выражение для контактного давления может быть записано в виде:

$$p(r, t) = F(t) \cdot \mathcal{R}(r) \quad (9)$$

где $\mathcal{R}(r)$ – некоторая функция, вид которой зависит от формы контактной поверхности.

При условии, что за рассматриваемый промежуток времени t совершается большое число колебаний величины нагрузки, а её амплитуда изменяется по квазигармоническому закону, значение интеграла в (8) может быть вычислено через среднее значение нагрузки \bar{F} за рассматриваемый промежуток времени [27]:

$$w(r, t) \approx \frac{K}{H} r \omega \mathcal{R}(r) \bar{F} t \quad (10)$$

Величина объемного износа, исходя из (7), в таком случае будет вычисляться как:

$$W \approx 2\pi \frac{K}{H} \bar{F} \omega t \int_{r_1}^{r_2} \mathcal{R}(\rho) \rho^2 d\rho \quad (11)$$

Оценку влияния принятых допущений проверим на примерах, приведенных на рисунке 2:

Выражения для вычисления величины объемного износа при постоянном значении действующей нагрузки, указанные в [26, 28] для данных типов поверхностей, могут быть получены из (11) и приведены в таблице 1.

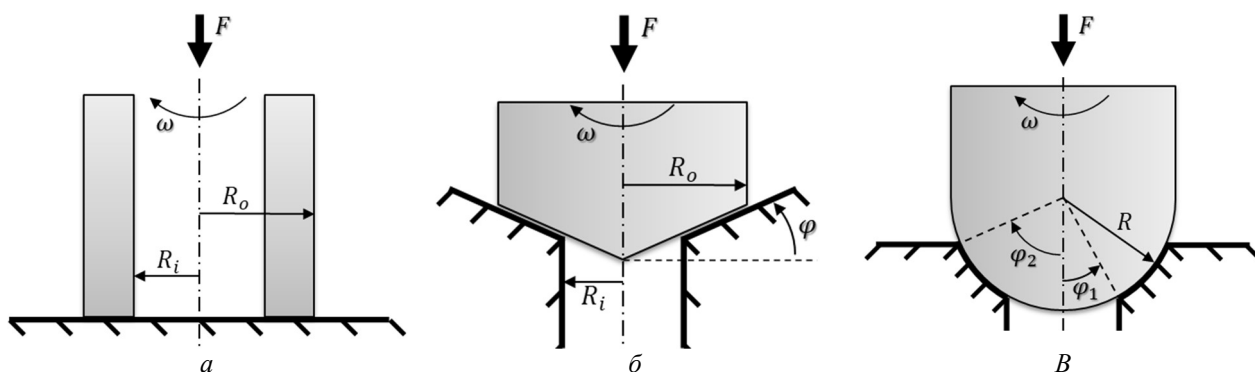


Рисунок 2 – Модельные задачи

a – труба круглого сечения; *б* – коническая поверхность; *в* – сферическая поверхность

Таблица 1 – Выражения для вычисления объемного износа

Тип поверхности	Выражение для вычисления объемного износа
Труба круглого сечения	$W = \frac{1}{2} \frac{K}{H} \bar{F} (R_i + R_o) \omega t$
Коническая поверхность	$W = \frac{1}{2} \frac{K}{H} \frac{\bar{F}}{\cos \varphi} (R_i + R_o) \omega t$
Сферическая поверхность	$W = \frac{K}{H} \bar{F} R \frac{\cos 2\varphi_1 - \cos 2\varphi_2}{\sin 2\varphi_2 + 2\varphi_2 - \sin 2\varphi_1 - 2\varphi_1} \omega t$

Будем рассматривать вертикальную нагрузку, действующую на опорную пару, такую, что её зависимость от времени выражается в виде:

$$F(t) = \bar{F} + \alpha \sum_i \sin(\xi_i t) \tag{12}$$

где \bar{F} – среднее значение действующей нагрузки;
 α – размах колебаний величины нагрузки;
 ξ_i – частоты гармоник колебаний величины нагрузки.

Амплитуда α выбирается таким образом, чтобы на всем рассматриваемом временном интервале значение нагрузки было строго положительным. Значения ξ_i подобраны так, что на рассматриваемом временном интервале помещается целое число периодов функции $F(t)$, таким образом её среднее значение в точности равно \bar{F} .

На рисунке 3 графически показаны зависимости нагрузки от времени, применяемые при численном моделировании.

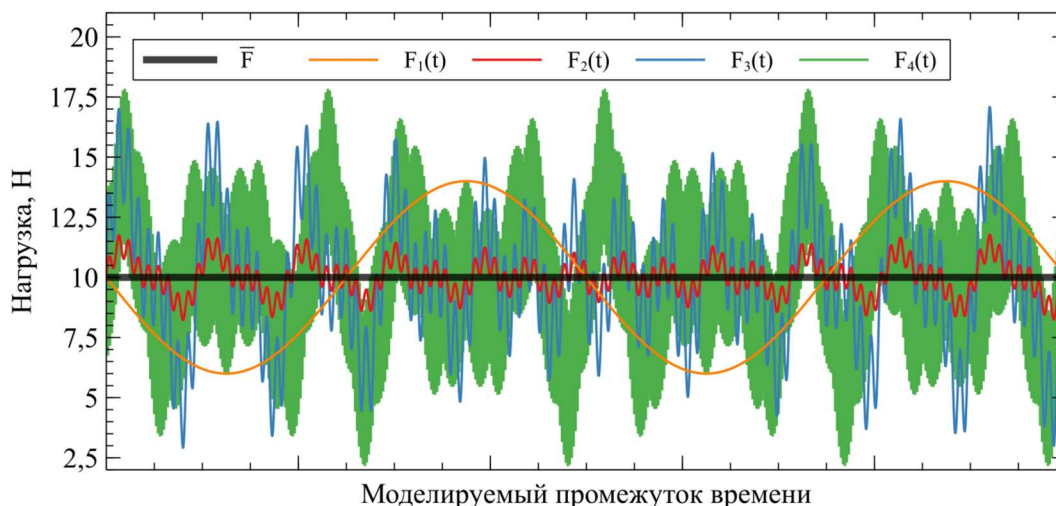


Рисунок 3 – Расчетные зависимости нагрузки от времени

Для каждой из представленных на рисунке 2 геометрических конфигураций контактной пары проведено численное моделирование изнашивания при действии переменных вертикальных нагрузок, приведенных на рисунке 3. Результаты расчетов – графики зависимости объемного износа от количества совершенных оборотов – представлены на рисунке 4.

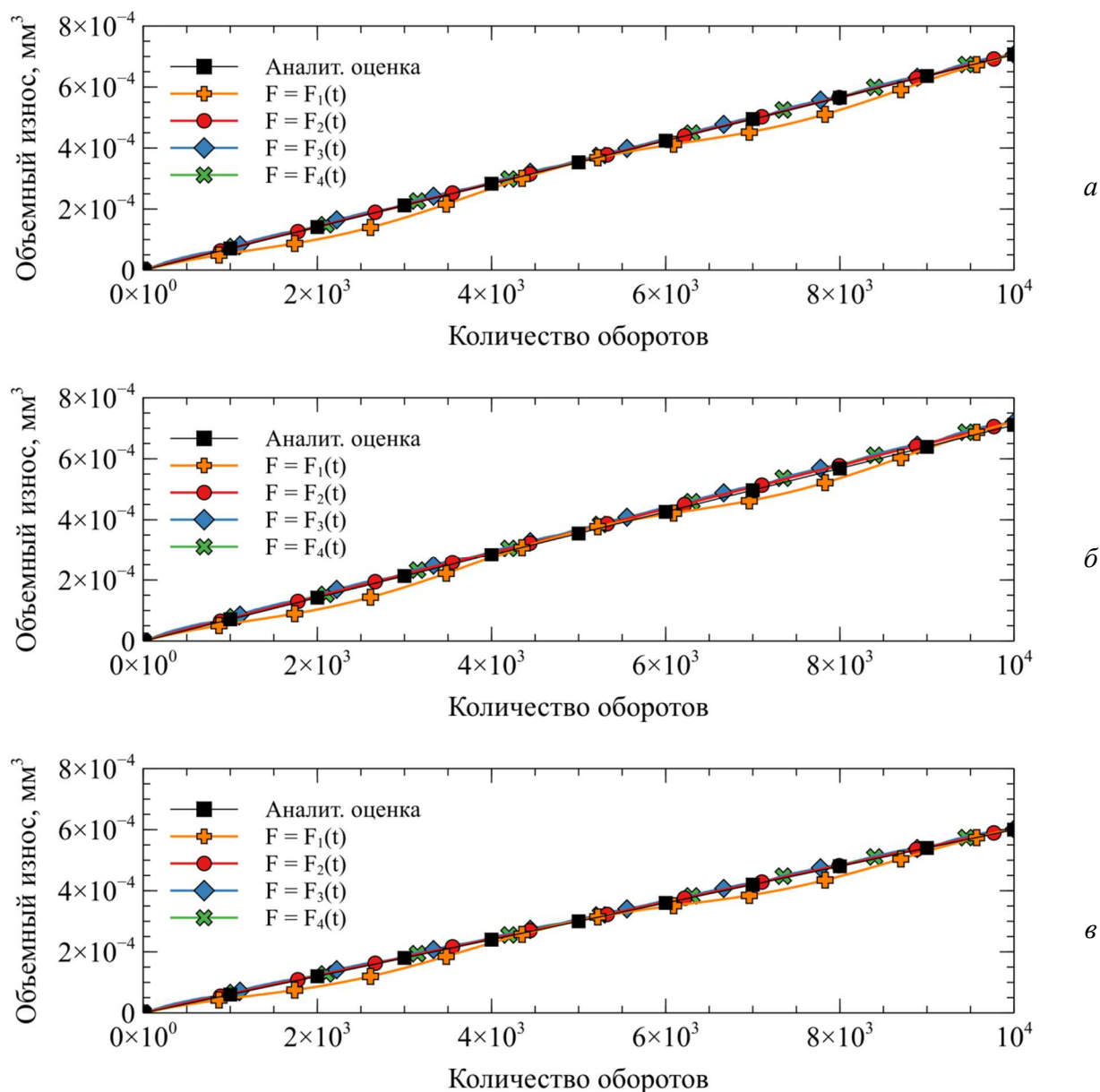


Рисунок 4 – Расчетные зависимости величины объемного износа от количества оборотов опорной пары
 а – труба круглого сечения; б – коническая поверхность; в – сферическая поверхность

Полученные результаты свидетельствуют о корректности сделанного предположения: в случае постоянной контактной поверхности действие переменной квазипериодической нагрузки практически равносильно действию среднего значения этой нагрузки на рассматриваемом временном интервале, причем чем выше частота колебания амплитуды нагрузки, тем меньшее влияние оно оказывает на величину объемного износа пары трения.

Для оценки влияния изменения контактной поверхности в процессе изнашивания на возможность использования осредненной величины действующей нагрузки при решении износоконтактной задачи проведены сравнительные расчеты с постоянной (\bar{F}) и переменными ($F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$, $F_4(t)$) нагрузками для геометрии, представленной на рисунке 5.

Результаты моделирования – зависимость объемного износа от количества совершенных оборотов – приведены на рисунке 6.

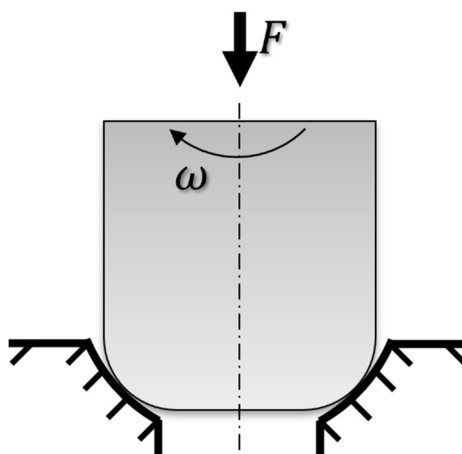


Рисунок 5 – Износоконтактная задача с переменной площадью

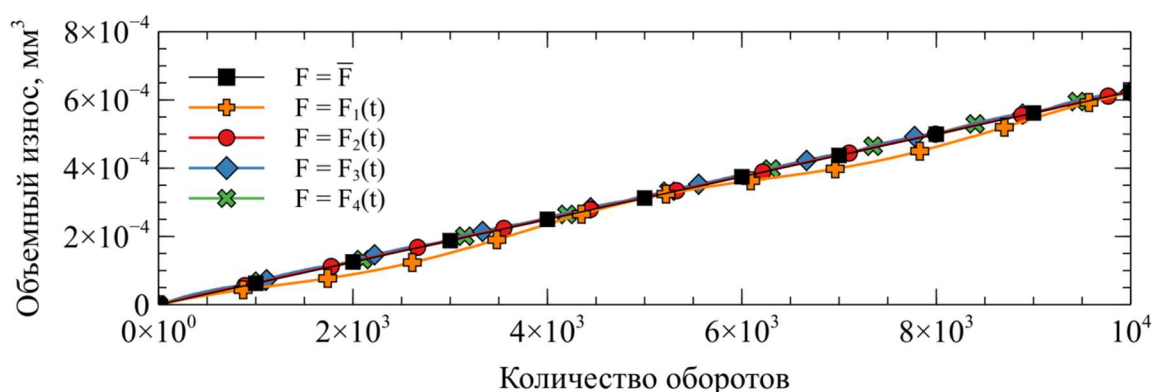


Рисунок 6 – Расчетные величины объемного износа для переменной площади контакта

Как и в случаях с постоянной площадью контакта, для пары трения с изменяющейся площадью контакта величина объемного износа слабо зависит от колебаний величины нагрузки и определяется её средним значением.

Заключение

При проектировании роторных систем, в конструкцию которых входят камневые опоры, необходимо учитывать изнашивание последних для оценки долговечности изделия, принимая во внимание возможные изменения действующих нагрузок.

Вертикальная сила, действующая на опорную пару, в действительности может изменяться вследствие колебательных процессов, проходящих в системе, и, хотя точные значения амплитуды и частоты изменения нагрузки могут оставаться неизвестными, можно предположить, что её среднее значение будет сохраняться на некотором временном интервале.

С помощью численного моделирования установлено, что влияние колебаний значений амплитуды нагрузки на величину объемного износа тем меньше, чем выше частота этих колебаний. В реальных системах она может быть сравнима с частотой вращения опорной пары.

Показано, что как в случае постоянной площади контактной поверхности, так и с учетом её изменения в процессе изнашивания, для расчёта изнашивания достаточно знать среднее значение действующей нагрузки.

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. Shoter 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. Износостойкая 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. Hegadekotte 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. – M.: 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. – M.: Fizmatkniga, 2010. 160 s.
7. Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na trenie I iznos. — M.: 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 — M.: Mashinostroenie, 2001. 664 s.
9. Wills G.J. Lubrication Fundamentals. Marcel Dekker Inc., New York, 1980.
10. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya I fizika treniya. – M.: 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. 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. 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.

Введение

Одной из важных проблем направления строительной механики, посвященного разработке теории конструкционной безопасности стержневых и балочных конструкций, взаимодействующих с упругими основаниями, является учёт воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации. В частности, в силу практической важности, весьма актуальными являются исследования по динамике стержней с трещинами [1-7]. В настоящей работе представлены постановка и аналитическое решение проблемы возбуждения колебаний и их последствий в статически нагруженной системе «балка – двухпараметрическое основание Пастернака», причиной которых послужило внезапное образование трещины. При этом, система рассматривается как конструктивно нелинейная, изменяющая физическую и расчётную схемы под нагрузкой.

Ниже рассматривается балка, опертая на упругое основание Пастернака, определённым образом закреплённая по концам и статически нагруженная равномерно распределённой нагрузкой интенсивности q (рисунок 1).

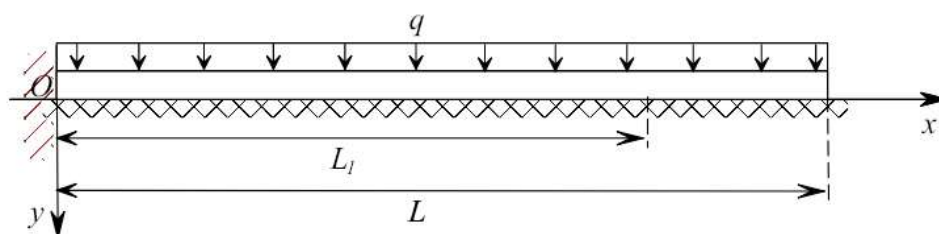


Рисунок 1 – Расчётная схема балки на основании Пастернака

В некоторый момент $t = 0$ в сечении L_1 образовалась открытая (выходящая наружу) трещина глубиной a . Внезапное образование трещины инициирует в балке процесс изгибных колебаний, в ходе которых деформации и напряжения могут превысить рабочие статические значения и привести к разрушению. Расчёт статического напряженно-деформированного состояния (НДС) необходим для формирования начальных условий динамического процесса, а также для оценки динамических догрузок и деформаций.

Основная часть

1. Статический изгиб балки на упругом основании Пастернака

Изгиб балки $y = y(x)$ описывается уравнением [8]

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K_1 y - K_2 \frac{d^2 y}{dx^2} = q(x) \quad (1)$$

Введением безразмерных переменных и параметров

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad w = \frac{y}{L}, \quad \alpha = \sqrt[4]{\frac{K_1 L^4}{4EI}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{K_2 L^2}{4EI}}, \quad \bar{q} = \frac{qL^3}{EI},$$

где $K_1 = \bar{K}_1 B \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]$, $K_2 = \bar{K}_2 B \text{ [Н]}$,

\bar{K}_1, \bar{K}_2 – соответственно изгибная и сдвиговая жёсткость основания Пастернака,

B – ширина призматического сечения балки,

приводим уравнение (1) к виду

$$w^{IV} - 4\beta^2 w'' + 4\alpha^4 w = \bar{q}. \quad (2)$$

Используя подстановку Эйлера $w = Ae^{n\xi}$, получаем характеристическое уравнение для соответствующего (2) однородного уравнения

$$n^4 - 4\beta^2 n^2 + 4\alpha^4 = 0. \quad (3)$$

Используя замену переменных $m = n^2$, получаем квадратное уравнение

$$m^2 - 4\beta^2 m + 4\alpha^4 = 0, \quad (4)$$

корни которого могут быть представлены в трёх вариантах, в зависимости от величин α, β

$$m_{1,2} = 2\beta^2 \pm 2\sqrt{\beta^4 - \alpha^4}, \quad \text{если } \beta > \alpha, \quad (5)$$

$$m_{1,2} = 2\beta^2 \pm 2i\sqrt{\alpha^4 - \beta^4}, \quad \text{если } \beta < \alpha, \quad (6)$$

$$m_{1,2} = 2\beta^2, \quad \text{если } \beta = \alpha. \quad (7)$$

Если ввести параметр $N_0 = 2\sqrt{K_1 EI}$, имеющий размерность силы (условная сила), то соотношения между безразмерными величинами α и β

$$\beta > \alpha, \quad \beta < \alpha, \quad \beta = \alpha$$

можно заменить аналогичными соотношениями между размерными величинами N_0 и K_2

$$K_2 > N_0, \quad K_2 < N_0, \quad K_2 = N_0, \quad (8)$$

так как $\alpha = \sqrt{\frac{N_0 L^2}{4EI}}$, $\beta = \sqrt{\frac{K_2 L^2}{4EI}}$.

Соотношения (8) можно представить в следующем виде

$$K_2 > 2\sqrt{K_1 EI}, \quad K_2 < 2\sqrt{K_1 EI}, \quad K_2 = 2\sqrt{K_1 EI},$$

характеризующим различное соотношение между жесткостными параметрами основания.

Далее будем рассматривать вариант (6) как наиболее близкий к реальности [9, 10].

В этом случае уравнение (3) имеет комплексные корни

$$n_{1-4} = \pm a \pm ib, \quad a = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad b = \sqrt{\alpha^2 - \beta^2} \quad (9)$$

и функции прогибов имеют вид

$$w = w_0 F_4(\xi) + w'_0 F_3(\xi) + w''_0 F_2(\xi) + w'''_0 F_1(\xi) + F_5(\xi), \quad (10)$$

где $F_1(\xi) = \frac{1}{2(a^2+b^2)} \left(\frac{\text{ch } a\xi \sin b\xi}{b} - \frac{\text{sh } a\xi \cos b\xi}{a} \right)$,

$$F_2(\xi) = \frac{1}{2ab} \text{sh } a\xi \sin b\xi,$$

$$F_3(\xi) = \frac{1}{2(a^2+b^2)} \left(\frac{3a^2-b^2}{a} \text{sh } a\xi \cos b\xi - \frac{a^2-3b^2}{b} \text{ch } a\xi \sin b\xi \right),$$

$$F_4(\xi) = \text{ch } a\xi \cos b\xi - \frac{a^2-b^2}{2ab} \text{sh } a\xi \sin b\xi,$$

$$F_5(\xi) = \frac{\bar{q}}{4\alpha^4} (1 - F_4(\xi)).$$

Два начальных параметра в формуле (10) всегда известны при постановке задачи, остальные определяются из условий на конце балки $\xi = 1$.

Последовательно дифференцируя функцию (10), получим угол поворота поперечного сечения $w'(\xi)$, изгибающий момент $w''(\xi)$ и перерезывающую силу $w'''(\xi)$.

Представим статическое состояние произвольного сечения ξ балки в матрично-векторной форме [8]

$$\bar{w} = V_{\text{ст}}(\xi) \bar{w}_0 + \bar{Q}(\xi), \quad (11)$$

где $\bar{w}(\xi) = \{w(\xi) \quad w'(\xi) \quad w''(\xi) \quad w'''(\xi)\}^T$ – вектор состояния произвольного сечения ξ ;

$\bar{w}_0 = \{w_0 \quad w'_0 \quad w''_0 \quad w'''_0\}^T$ – вектор начальных параметров;

$$V_{ст}(\xi) = \begin{pmatrix} F_4(\xi) & F_3(\xi) & F_2(\xi) & F_1(\xi) \\ -(a^2 + b^2)^2 F_1(\xi) & F_4(\xi) & F_6(\xi) & F_2(\xi) \\ -(a^2 + b^2)^2 F_2(\xi) & -(a^2 + b^2)^2 F_1(\xi) & F_7(\xi) & F_6(\xi) \\ -(a^2 + b^2)^2 F_6(\xi) & -(a^2 + b^2)^2 F_2(\xi) & F_8(\xi) & F_7(\xi) \end{pmatrix} - \text{матрица влияния}$$

начальных параметров на состояние произвольного сечения ξ ;

$$\bar{Q}(\xi) = \bar{q} \left\{ \frac{1-F_4(\xi)}{(a^2+b^2)^2} \quad F_1(\xi) \quad F_2(\xi) \quad F_6(\xi) \right\}^T - \text{вектор нагрузки};$$

$$F_6(\xi) = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{ch } a\xi \sin b\xi}{b} + \frac{\text{sh } a\xi \cos b\xi}{a} \right);$$

$$F_7(\xi) = \text{ch } a\xi \cos b\xi + \frac{a^2-b^2}{2ab} \text{sh } a\xi \sin b\xi;$$

$$F_8(\xi) = \frac{1}{2} \left(\frac{3a^2-b^2}{a} \text{sh } a\xi \cos b\xi + \frac{a^2-3b^2}{b} \text{ch } a\xi \sin b\xi \right).$$

Далее неизвестные начальные параметры определяются после уточнения граничных условий.

2. Математическая модель динамики балки с трещиной, опёртой на упругое основание Пастернака

Физической моделью балки, опёртой на упругое основание, испытывающей изгибные колебания в результате внезапного образования трещины, считаем конструкцию, состоящую из двух балочных сегментов, соединённых пружиной кручения с жёсткостью K_T , расположенной в сечении с трещиной [11]. Оба сегмента до и после образования трещины опираются на упругое двухпараметрическое основание Пастернака.

Поперечные перемещения $v_i = v_i(\xi_i, \tau)$ сечений сегментов определяются решениями уравнений вынужденных колебаний сегментов [12]

$$\frac{\partial^4 v_i}{\partial \xi_i^4} - 4\beta^2 \frac{\partial^2 v_i}{\partial \xi_i^2} + 4\alpha^4 \left(v_i + \frac{\partial^2 v_i}{\partial \tau^2} \right) = \bar{q}(\xi_i, \tau) \quad (i = 1, 2), \quad (12)$$

записанных в безразмерных переменных и параметрах

$$\xi_i = \frac{x_i}{L}, \quad v_i = \frac{y_i}{L}, \quad \tau = \omega_{01} t, \quad \omega_{01} = \sqrt{\frac{K_1}{\rho A}}, \quad \chi = \frac{a}{L},$$

где ρ – удельная масса балки,
 A – площадь её поперечного сечения.

2.1. Собственные изгибные колебания сегментов балки.

Введением двух параметров, имеющих размерность частоты

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{K_1}{\rho A}}, \quad \omega_{02} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{K_2}{\rho A}},$$

преобразуем однородные уравнения, соответствующие уравнениям (12) и описывающие собственные изгибные колебания балки, к виду

$$\frac{\partial^4 v_i}{\partial \xi_i^4} - 4\omega_{02}^2 \frac{\partial^2 v_i}{\partial \xi_i^2} + \omega_{01}^2 \left(v_i + \frac{\partial^2 v_i}{\partial \tau^2} \right) = 0. \quad (13)$$

Далее колебания сегментов балки рассматриваем отдельно. Постоянные интегрирования определяем из граничных условий и условий сопряжения сегментов.

Поскольку сегменты, образующиеся после возникновения трещины, отличаются только длиной, то уравнения их собственных колебаний будут иметь единый вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 v_1}{\partial \xi_1^4} - 4\omega_{02}^2 \frac{\partial^2 v_1}{\partial \xi_1^2} + \omega_{01}^2 \left(v_1 + \frac{\partial^2 v_1}{\partial \tau^2} \right) &= 0, \quad 0 \leq \xi_1 \leq v, \\ \frac{\partial^4 v_2}{\partial \xi_2^4} - 4\omega_{02}^2 \frac{\partial^2 v_2}{\partial \xi_2^2} + \omega_{01}^2 \left(v_2 + \frac{\partial^2 v_2}{\partial \tau^2} \right) &= 0, \quad 0 \leq \xi_2 \leq 1 - v, \end{aligned} \quad (14)$$

где $v = \frac{L_1}{L}$ – относительная длина первого участка.

Решения уравнений (14) ищем, полагая колебания гармоническими и разделяя переменные представлением

$$v_i(\xi_i, \tau) = W_i(\xi_i) \sin \frac{\tilde{\omega}}{\omega_{01}} \tau, \quad (15)$$

где $\tilde{\omega} = \frac{\omega}{\omega_3}$ – безразмерная искомая частота колебаний,

$\bar{\omega}_{01} = \frac{\omega_{01}}{\omega_3}$ – безразмерная условная частота,

$\omega_3 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ – эталонная частота.

Далее в качестве обобщённой жёсткости системы «балка-основание» вместо параметра α будем использовать безразмерную условную частоту $\bar{\omega}_{01}$, как параметр, имеющий определённый физический смысл (несколько эталонных частот или несколько долей эталонной частоты ω_3). Исключая жёсткость основания K_1 из соотношений

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{K_1}{\rho A}} \text{ и } \alpha = \sqrt[4]{\frac{K_1 L^4}{4EI}}$$

и учитывая эталонную частоту ω_3 , получим связь

$$4\alpha^4 = \frac{\omega_{01}^2}{\frac{1}{L^4} \frac{EI}{\rho A}} = \left(\frac{\omega_{01}}{\omega_3}\right)^2 = \bar{\omega}_{01}^2.$$

Подставляя (15) в уравнения (14), находим уравнения для форм собственных колебаний сегментов

$$W_i^{IV} - 4\bar{\omega}_{02}^2 W_i'' + (\bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2) = 0. \quad (16)$$

Структура уравнений (16) подразумевает возможность следующих вариантов решений.

2.1.1 Если $\tilde{\omega} > \bar{\omega}_{01}$, то записывая уравнение (16) в виде

$$W_i^{IV} - 4\bar{\omega}_{02}^2 W_i'' - (\tilde{\omega}^2 - \bar{\omega}_{01}^2) = 0, \quad (17)$$

и решая последнее подстановкой Эйлера

$$W_i = Ae^{n\xi_i}, \quad (18)$$

получим характеристическое уравнение

$$n^4 - 4\bar{\omega}_{02}^2 n^2 - (\tilde{\omega}^2 - \bar{\omega}_{01}^2) = 0 \quad (19)$$

или, полагая $m = n^2$, получим уравнение

$$m^2 - 4\bar{\omega}_{02}^2 m - (\tilde{\omega}^2 - \bar{\omega}_{01}^2) = 0,$$

корни которого – действительные числа

$$m_{1,2} = 2(\beta^2 \pm \sqrt{\beta^4 + \gamma^4}),$$

где $\beta = \bar{\omega}_{02}^2$,

$$\gamma = \sqrt[4]{\frac{\tilde{\omega}^2 - \bar{\omega}_{01}^2}{4}}.$$

Тогда корни уравнения (19) действительные

$$n_{1,2} = \pm p$$

и чисто мнимые

$$n_{3,4} = \pm i r,$$

где $p = \sqrt{2(\sqrt{\beta^4 + \gamma^4} + \beta^2)}$,

$$r = \sqrt{2(\sqrt{\beta^4 + \gamma^4} - \beta^2)}.$$

Функция прогибов в этом случае имеет вид

$$W_i(\xi_i) = A_1 \operatorname{ch} p\xi_i + A_2 \operatorname{sh} p\xi_i + A_3 \cos r\xi_i + A_4 \sin r\xi_i \quad (20)$$

2.1.2 Если $\tilde{\omega} < \bar{\omega}_{01}$, то решая уравнение (16) той же подстановкой, получим характеристическое уравнение

$$n^4 - 4\bar{\omega}_{02}^2 n^2 + (\bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2) = 0, \quad (21)$$

$$m^2 - 4\bar{\omega}_{02}^2 m + (\bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2) = 0, \quad (22)$$

корни уравнения (22)

$$m_{1,2} = 2\bar{\omega}_{02}^2 \pm \sqrt{4\bar{\omega}_{02}^4 - (\bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2)}.$$

Далее возможны следующие варианты

2.1.2.1 Если $4\bar{\omega}_{02}^4 > \bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2$, то корни уравнения (22) становятся действительными положительными, а корни уравнения (21) – действительными

$$n_{1,2} = \pm c, \quad n_{3,4} = \pm d,$$

где $c = \sqrt{2(\beta^2 + \sqrt{\beta^4 - \delta^4})}$,

$$d = \sqrt{2(\beta^2 - \sqrt{\beta^4 - \delta^4})},$$

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{\bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2}{4}},$$

и функция прогибов принимает вид

$$W_i(\xi_i) = A_1 \operatorname{ch} c\xi_i + A_2 \operatorname{sh} c\xi_i + A_3 \operatorname{ch} d\xi_i + A_4 \operatorname{sh} d\xi_i \quad (23)$$

В таком случае искомая частота удовлетворяет двойному неравенству

$$\bar{\omega}_{01}^2 - 4\bar{\omega}_{02}^4 < \tilde{\omega}^2 < \bar{\omega}_{01}^2$$

а значит, условные частоты удовлетворяют неравенству

$$\bar{\omega}_{02}^2 < 0,5 \bar{\omega}_{01}.$$

2.1.2.2 Если $4\bar{\omega}_{02}^4 < \bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2$, то корни $n_{1-4}, m_{1,2}$ комплексные

$$m_{1,2} = 2\bar{\omega}_{02}^2 \pm i\sqrt{(\bar{\omega}_{01}^2 - \tilde{\omega}^2) - 4\bar{\omega}_{02}^4},$$

$$n_{1-4} = \pm g \pm ih,$$

где $g = \sqrt{\delta^2 + \beta^2},$

$$h = \sqrt{\delta^2 - \beta^2},$$

а функция прогибов принимает вид

$$W_i(\xi_i) = A_1 \operatorname{ch} g\xi_i \cos h\xi_i + A_2 \operatorname{sh} g\xi_i \cos h\xi_i + A_3 \operatorname{ch} d\xi_i \sin h\xi_i + A_4 \operatorname{sh} d\xi_i \sin h\xi_i \quad (24)$$

В данном варианте при том же требовании к условным частотам

$$\bar{\omega}_{02}^2 < 0,5 \bar{\omega}_{01},$$

искомая частота $\tilde{\omega}$ должна удовлетворять неравенству

$$\tilde{\omega}^2 < \bar{\omega}_{01}^2 - 4\bar{\omega}_{02}^4.$$

2.1.3 Если $\tilde{\omega} = \bar{\omega}_{01}$, то получаем корни уравнения (22)

$$m_1 = 0, \quad m_2 = 4\beta^2,$$

а корни уравнения (21) становятся кратными

$$n_{1,2} = 0, \quad n_{3,4} = \pm 2\beta$$

и функция прогибов приобретает вид

$$W_i(\xi_i) = A_1 + A_2 \xi_i + A_3 \operatorname{ch} 2\beta \xi_i + A_4 \operatorname{sh} 2\beta \xi_i. \quad (25)$$

2.1.4 Матричное представление условия 2.1.1

В работе [13] показано, что для балки, полностью опёртой на основание Пастернака, в случае четырёх канонических типов закрепления концов (защемление-защемление, шарнир-шарнир, консоль: защемление-свободный конец, свободные концы) при условии $\alpha > \beta$, возможен единственный вариант соотношения искомой частоты $\tilde{\omega}$ и первой условной частоты $\bar{\omega}_{01}$, а именно

$$\tilde{\omega} > \bar{\omega}_{01}.$$

Поэтому далее, имея ввиду закрепление концов балки одним из перечисленных выше типов, будем использовать для обоих сегментов балки условие

$$\tilde{\omega}_1 > \bar{\omega}_{01}, \quad \tilde{\omega}_2 > \bar{\omega}_{01} \quad (26)$$

характеристическое уравнение (19) и решение (20) уравнения (17), которое при замене постоянных интегрирования A_j ($j = 1 \div 4$) начальными параметрами

$$W_{0i} = W_i(0), \quad W'_{0i} = W'_i(0), \quad W''_{0i} = W''_i(0), \quad W'''_{0i} = W'''_i(0),$$

принимает вид

$$W_i(\xi_i) = B_4(\xi_i)W_{0i} + B_3(\xi_i)W'_{0i} + B_2(\xi_i)W''_{0i} + B_1(\xi_i)W'''_{0i}, \quad (27)$$

где $B_1(\xi_i) = \frac{r \operatorname{sh} p\xi_i - p \sin r\xi_i}{rp(r^2 + p^2)},$

$$B_2(\xi_i) = \frac{\operatorname{ch} p\xi_i - \cos r\xi_i}{r^2 + p^2},$$

$$B_3(\xi_i) = \frac{r^3 \operatorname{sh} p\xi_i + p^3 \sin r\xi_i}{rp(r^2 + p^2)},$$

$$B_4(\xi_i) = \frac{r^2 \operatorname{ch} p\xi_i + p^2 \cos r\xi_i}{r^2 + p^2}.$$

Состояние произвольного сечения ξ_i i -го сегмента ($i=1,2$) описывается матричным уравнением

$$\bar{W}_i(\xi_i) = V_{12}(\xi_i)\bar{W}_{0i} \quad (28)$$

где $\bar{W}_i(\xi_i) = \{W_i(\xi_i) \quad W'_i(\xi_i) \quad W''_i(\xi_i) \quad W'''_i(\xi_i)\}^T$ – вектор состояния произвольного сечения i -го сегмента балки,

$\bar{W}_{0i} = \{W_{0i} \quad W'_{0i} \quad W''_{0i} \quad W'''_{0i}\}^T$ – вектор начальных параметров i -го сегмента балки,

$$V_{12}(\xi_i) = \begin{pmatrix} B_4(\xi_i) & B_3(\xi_i) & B_2(\xi_i) & B_1(\xi_i) \\ (rp)^2 B_1(\xi_i) & B_4(\xi_i) & B_5(\xi_i) & B_2(\xi_i) \\ (rp)^2 B_2(\xi_i) & (rp)^2 B_1(\xi_i) & B_6(\xi_i) & B_5(\xi_i) \\ (rp)^2 B_5(\xi_i) & (rp)^2 B_2(\xi_i) & B_7(\xi_i) & B_6(\xi_i) \end{pmatrix} \text{ – матрица влияния начальных}$$

параметров на состояние произвольного сечения i -го сегмента балки,

$$B_5(\xi_i) = \frac{p \operatorname{sh} p\xi_i + r \sin r\xi_i}{r^2 + p^2},$$

$$B_6(\xi_i) = \frac{p^2 \operatorname{ch} p \xi_i + r^2 \cos r \xi_i}{r^2 + p^2},$$

$$B_7(\xi_i) = \frac{p^3 \operatorname{sh} p \xi_i - r^3 \sin r \xi_i}{r^2 + p^2}.$$

2.2 Собственные изгибные колебания балки с трещиной

Ниже рассматриваются собственные изгибные колебания балки, состоящей из двух сегментов, опёртых на основание Пастернака и соединённых пружиной кручения с жёсткостью K_T .

Предполагается, что неповреждённая балка свободно лежит на основании, то есть граничные условия задачи имеют вид

$$W_{01} = W'_{01} = 0, \quad W''_2(1 - \nu) = W'''_2(1 - \nu) = 0. \quad (29)$$

Используя уравнения для собственных колебаний сегментов (28), граничные условия (29), условия сопряжения сегментов [11]

$$W_1(\nu) = W_2(0),$$

$$W'_1(\nu) = W'_2(0),$$

$$W''_1(\nu) = W''_2(0)$$

и учитывая изгибающий момент в сечении с трещиной $\xi_1 = \nu$

$$W''_1(\nu) = \frac{1}{\Theta} (W'_2(0) - W'_1(\nu)), \quad \Theta = \frac{EI}{K_T L},$$

вызываемый взаимным поворотом двух сегментов, соединяемых пружиной кручения с жёсткостью K_T и локальной гибкостью Θ , получаем связь начальных параметров \bar{W}_{01} и \bar{W}_{02} сегментов и систему однородных уравнений относительно двух неизвестных начальных параметров W''_{01} и W''_{01}

$$\begin{aligned} U_1 W''_{01} + T_1 W''_{01} &= 0, \\ U_2 W''_{01} + T_2 W''_{01} &= 0, \end{aligned} \quad (30)$$

где $U_1 = (rp)^2 (B_2(1 - \nu)B_2(\nu) + B_1(1 - \nu)(B_5(\nu) + \Theta B_6(\nu))) + B_1(1 - \nu)B_6(\nu) + B_5(1 - \nu)B_7(\nu),$

$U_2 = (rp)^2 (B_5(1 - \nu)B_2(\nu) + B_2(1 - \nu)(B_5(\nu) + \Theta B_6(\nu))) + B_7(1 - \nu)B_6(\nu) + B_6(1 - \nu)B_7(\nu),$

$T_1 = (rp)^2 (B_2(1 - \nu)B_1(\nu) + B_1(1 - \nu)(B_2(\nu) + \Theta B_5(\nu))) + B_6(1 - \nu)B_5(\nu) + B_5(1 - \nu)B_6(\nu),$

$T_2 = (rp)^2 (B_5(1 - \nu)B_1(\nu) + B_2(1 - \nu)(B_2(\nu) + \Theta B_5(\nu))) + B_7(1 - \nu)B_5(\nu) + B_6(1 - \nu)B_6(\nu).$

Приравняв определитель матрицы коэффициентов системы уравнений (30) нулю, получим частотное уравнение

$$U_1 T_2 - U_2 T_1 = 0, \quad (31)$$

которое содержит два параметра, характеризующих дефект: безразмерную локальную гибкость Θ в сечении с трещиной и локализацию трещины ν .

В работах [14, 15] жёсткость пружины кручения K_T предлагается рассчитывать по формуле

$$K_T = \frac{1}{c},$$

где $c = \frac{5,346}{EI} J(\chi),$

$J(\chi) = 1,86\chi^2 - 3,55\chi^3 + 16,37\chi^4 - 37,23\chi^5 + 76,8\chi^6 - 126,5\chi^7 + 172\chi^8 - 143\chi^9 + 44,05\chi^{10}$ – функция относительной глубины χ трещины.

Тогда гибкость Θ определяется формулой

$$\Theta = 5,346 J(\chi) \frac{h}{L},$$

где $\frac{h}{L}$ – удлинение балки.

3. Численные результаты

Расчёты в разделе проводились для балки с удлинением $\frac{h}{L} = 0,027$ и обобщёнными жёсткостями $\alpha = 3,6$ и $\beta = 1,75$, что соответствует следующим характеристикам системы «балка-основание»:

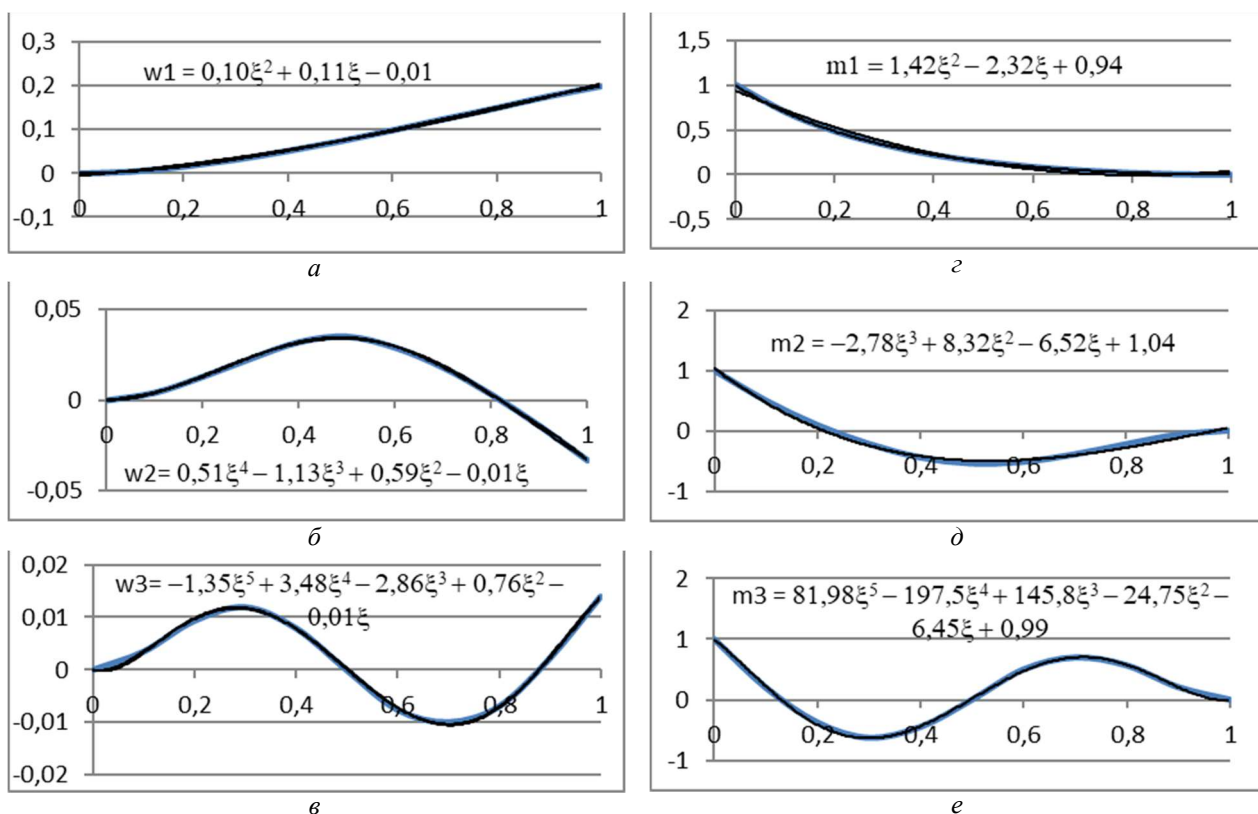


Рисунок 2 – Формы собственных колебаний: а – 1ая форма, б – 2ая форма, в – 3я форма) и изгибающие моменты, соответствующие формам колебаний (г – 1ая форма, д – 2ая форма, е – 3я форма) балки с внезапно возникшей трещиной глубиной $\chi = 0,5$ в среднем сечении $\nu = 0,5$

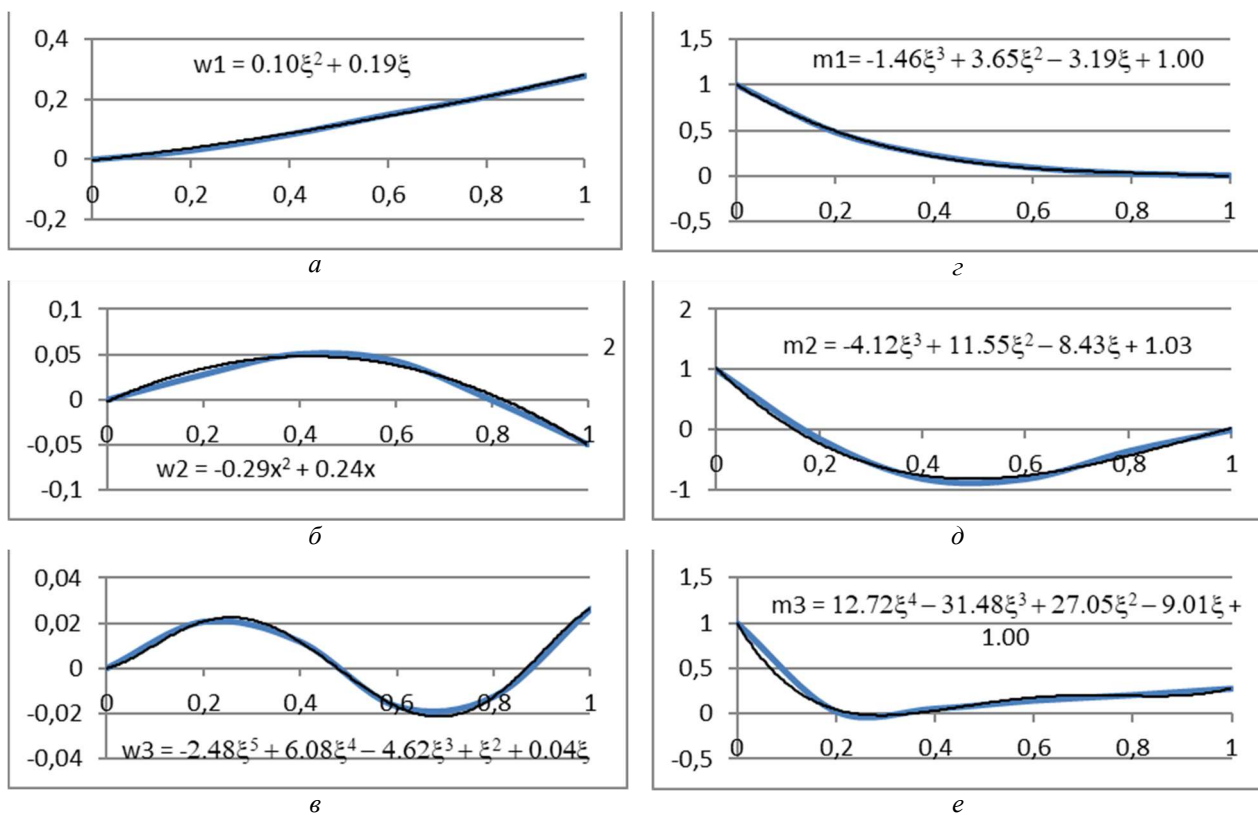


Рисунок 3 – Формы собственных колебаний: а – 1ая форма, б – 2ая форма, в – 3я форма) и изгибающие моменты, соответствующие формам колебаний (г – 1ая форма, д – 2ая форма, е – 3я форма) балки с внезапно возникшей трещиной глубиной $\chi = 0,9$ в среднем сечении $\nu = 0,5$

балка: длина $L = 6,7$ м; поперечное сечение – прямоугольник со сторонами: ширина

$B = 0,25$ м, высота $h = 0,18$ м; площадь $A = 0,045$ м²; осевой момент инерции $I = 1,215 \cdot 10^4$ м⁴; модуль упругости материала $E = 3,05 \cdot 10^{10}$ Н/м²;

основание: гравий с параметром жёсткости $K_1 = 7,5 \cdot 10^6$ Н/м³; коэффициент постели K_1 с учетом ширины основания $B = 0,25$ м равен $K_1 = \bar{K}_1 B = 1,875 \cdot 10^6$ Н/м²;

обобщённый параметр жёсткости системы «балка-основание»: $\alpha = 3,6$, $\bar{\omega}_{01} = 26$;

экспериментальных данных, относящихся к параметру Пастернака K_2 системы «балка-основание» явно недостаточно, но, согласно рекомендациям, приведённым в работах [9-10], $K_2 = 0,35K_1$ м² = $0,65 \cdot 10^6$ Н;

нагрузка: перпендикулярная оси балки, равномерно распределённая, с безразмерной интенсивностью $\bar{q} = 1$.

Для различных значений характеристик дефекта: глубины и локализации трещины рассчитывались первые три частоты собственных колебаний, соответствующие им формы колебаний и функции распределения изгибающих моментов.

На рисунках 2, 3 приводятся формы собственных колебаний и изгибающие моменты, соответствующие этим формам для двух случаев внезапного образования в середине балки ($\nu = 0,5$) трещины различной глубины ($\chi = 0,5$ – рисунок 2 и $\chi = 0,9$ – рисунок 3).

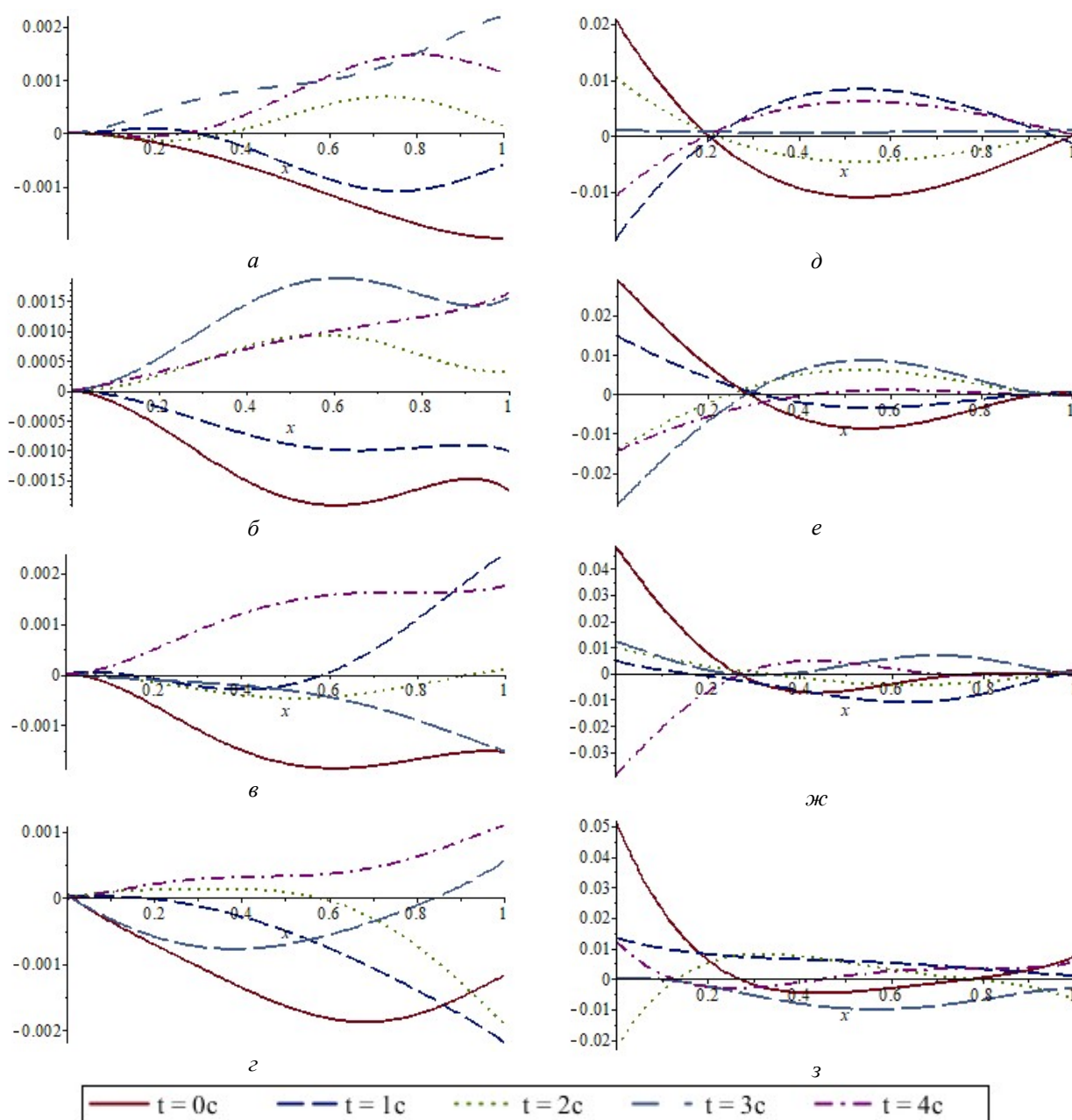


Рисунок 4 – Эпюры прогибов (а-з) и изгибающие моменты (д-з) в различные моменты времени балки с внезапно возникшей трещиной

а, д – $\chi = 0,5$, $\nu = 0,5$; б, е – $\chi = 0,5$, $\nu = 0,1$; в, ж – $\chi = 0,9$, $\nu = 0,5$; з, з – $\chi = 0,5$, $\nu = 0$

Прогибы и моменты в ходе вынужденных колебаний рассчитывались разложением статических прогибов и моментов неповрежденной балки по формам собственных колебаний и моментов балки с образовавшимся дефектом [16].

На рисунке 4 изображены прогибы балки (а-г) и изгибающие моменты (д-з) для пяти моментов времени при различных сочетаниях локализации трещины ($\nu = 0,5$ – середина балки, $\nu = 0,1$ – сечение вблизи от заделки, $\nu = 0$ – сечение в заделке) и глубине ($\chi = 0,5$ и $0,9$).

На рисунках 5-12 показаны развёртки колебаний концевого ($\xi = 1$) и срединного ($\xi = 0,5$) сечений балки и изменений изгибающего момента в срединном сечении и в заделке ($\xi = 0$) при различных сочетаниях параметров трещины: глубины χ и локализации ν .

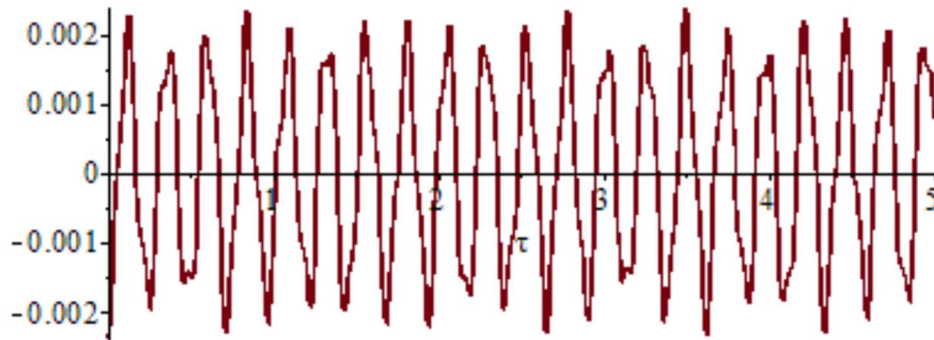


Рисунок 5 – Колебания свободного конца $\xi = 1$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,5$, $\nu = 0,5$

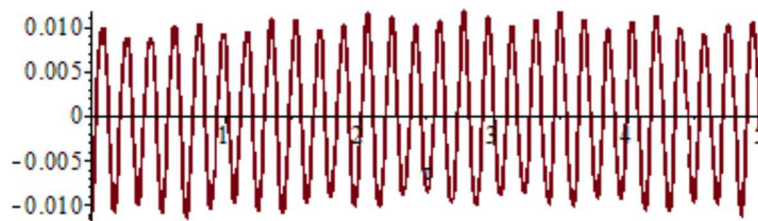


Рисунок 6 – Изменения изгибающего момента в сечении $\xi = 0,5$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,5$, $\nu = 0,5$

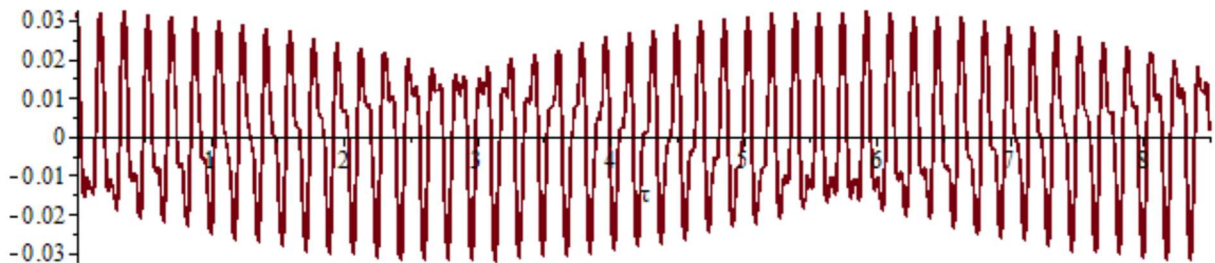


Рисунок 7 – Изменения изгибающего момента в заделке $\xi = 0$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,5$, $\nu = 0,5$

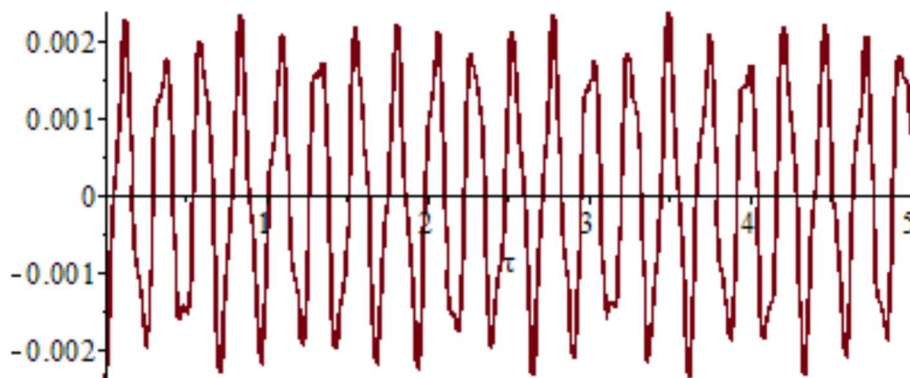


Рисунок 8 – Прогиб сечения $\xi = 0,1$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,5$, $\nu = 0,1$

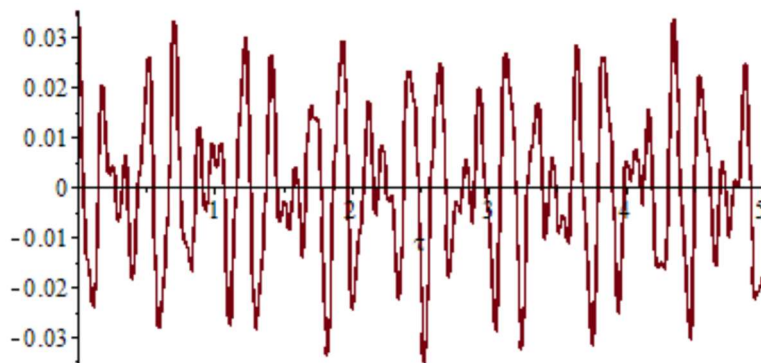


Рисунок 9 – Изменения изгибающего момента в заделке $\xi = 0$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,5, \nu = 0,1$

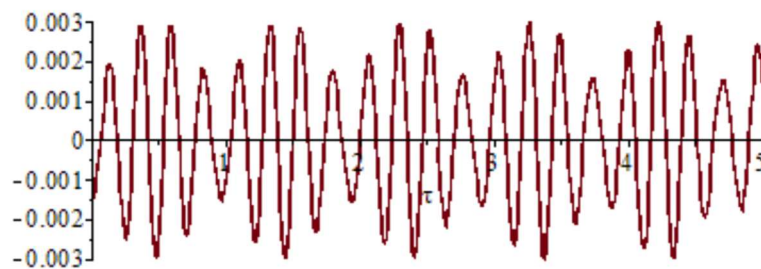


Рисунок 10 – Колебания свободного конца $\xi = 1$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,9, \nu = 0,5$

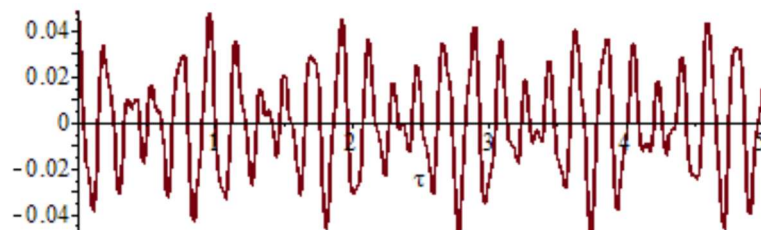


Рисунок 11 – Изменения изгибающего момента в заделке $\xi = 0$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,9, \nu = 0,5$

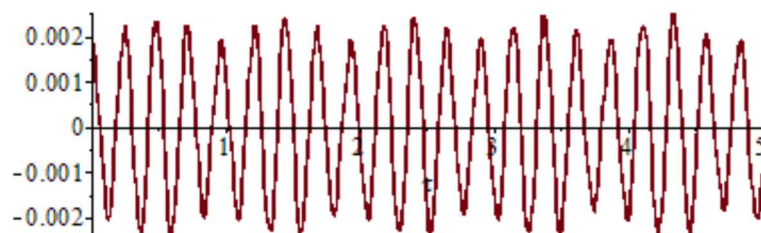


Рисунок 12 – Прогиб сечения $\xi = 0,5$ балки с внезапно возникшей трещиной $\chi = 0,9, \nu = 0,5$

Заключение

Построена математическая модель динамики конструктивно нелинейной системы взаимодействующих балки и основания. Разработан аналитический метод расчёта характеристик динамического процесса, инициируемого трещинообразованием, внезапно изменяющим расчётную схему конструкции. Метод связывает уровни динамических приращений деформаций и внутренних усилий с характеристиками дефекта – глубиной и локализацией трещины. Результаты работы расширяют диапазон справочных данных для принятия конкретных конструктивно-технологических решений, для выработки норм и стандартов на проектирование, возведение и эксплуатацию конструкций и сооружений.

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.215-2221-7.
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-mail: bsut@bsut.by

Гордон Владимир Александрович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической физики и математики
302026, 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. – 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. 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` texniki i texnologii*. – 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` texniki i texnologii*. – 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` texniki i texnologii*, 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 treshhinoobrazovanii / 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, цель 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 α -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.

Введение

Каждый элемент энергонагруженной машины, как правило, эксплуатируется при высоких температурных нагрузках, а также находится под воздействием той или иной агрессивной среды. К основным причинам выхода из строя рабочих компонентов, стоит отнести изнашивание, а также коррозию (включая, химическую деформацию и прочие) их поверхностей. Износ представляет собой достаточно сложный для описания физико-химический процесс, часто сопровождаемый ржавчиной и эрозией. Для оптимизации функциональных характеристик используются несколько ключевых методик, к примеру, ХТО, поверхностное упрочнение, напыление тех или иных покрытий, прочие [1].

Изучение публикаций в этой области показывает, что одним из наиболее перспективных способов модификации поверхностей – это ионная плазменная обработка в глубоком вакууме. Среди преимуществ этого метода нужно отметить: высокую производительность, высокую твердость создаваемых покрытий, хорошую воспроизводимость характеристик наносимых покрытий.

Обзор и анализ литературных источников.

Глубоковакуумная ионная плазменная технология (далее – ВИПТ) характеризуется множеством достоинств относительно традиционных методик обрабатывания поверхностей. Однако, к большому сожалению, на сегодняшний день она недостаточно активно применяется в промышленном производстве [2]. Это обуславливается необходимостью применения довольно сложных установок, выполняющих обработку по методикам ВИПТ, а также нехваткой квалифицированных кадров. Вместе с тем, в обозримой перспективе эта технология будет потенциально востребована, следовательно, – актуальным является её дальнейшее исследование, модифицирование, оптимизация. Далее представлено сравнение с некоторыми другими технологиями, известными по литературе.

На пример, известна технология обработки электрическими разрядами посредством плазменных генераторов, имеющих накальный катод, под воздействием температур 210 градусов Цельсия, что отражено в [3,4]. Слабой стороной этой методики можно назвать то, что в процессе обрабатывания массивной заготовки не представляется возможным создать необходимый высокотемпературный режим, а потому требуется нагревать обрабатываемое изделие. Один из лучших вариантов нагревания заготовок заключается в применении электрического разряда, поддерживаемого рядом вспомогательных генераторов, которые вырабатывают тот или иной поток, способный разогреть заготовки. В роли плазменного генератора может выступать специальный глубоковакуумный разряд, имеющий интегрально-холодный катод, что подробно описано в [5, 6], или плазменный генератор, описанный в [7].

Вместе с тем, в работе [8] описано ионноплазменное нитрирование электрическими разрядами посредством плазменных генераторов. Итогом исследования явилось то, что такая обработка электрическими разрядами приводит к повышению в 3-6 раз уровня нитрификации, по сравнению с осуществляемой в тлеющих разрядах. Кроме того, возможно насыщение обрабатываемых изделий алюминиевыми соединениями. Уникальность предложенной методики обусловлена тем, что вся цепочка операций реализована в одном процессе, что открывает возможность уменьшения продолжительности обрабатывания и оптимизации всей технологии, что подробно описывается в тексте [9].

В работе [10] рассматривается специфика использования пустотелых катодов в ходе ионной нитрификации в тлеющих разрядах. При этом, чтобы поддержать требуемый температурный режим каждого обрабатываемого изделия при нитрификации, выполняемой на фоне значительных токов, применялась специально разработанная охлаждающая система, а при невысоких токах – задействовались специальные установки нитрификации. Так, каждый сменный стальной диск до нитрификации подвергался стандартному температурному обрабатыванию, то есть он закаливался и отпускался. Опыты показывают, уровень качества ионно-плазменного покрытия, в общем случае, будет зависеть от: числа слоев, их чередования, истончения, рабочей температуры, длительности напыления [11]. Многое также будет определяться спецификой эксплуатации готовых изделий (изнашивание, ржавление, прочие).

Преимущественная часть многоуровневых композиционных покрытий демонстрирует высокие показатели стойкости к деформированию, когда они эксплуатируются в высокотемпературных условиях. В тексте работ [12, 13] показано, что многоуровневые покрытия имеют повышенную износостойкость. Они могут обеспечивать устойчивые параметры прочности даже под воздействием высокотемпературной среды.

Методики, объекты и итоги исследования.

Оценивались технологические цепочки ионных плазменных модификаций поверхности. Анализировалась так же степень влияния структуры газа и ионных нитрификаций в тлеющих разрядах на механические свойства нитрируемых слоев. Ключевым материалом, который подвергался ионной нитрификации, была сталь 38Х2МЮА и сталь 08кп, а также титановая композиция ВТ-22. Ряд эксплуатационных характеристик рассматриваемых материалов отображается таблицей 1.

Таблица 1 – Структура и ключевые характеристики исследуемых материалов.

Наименование сплавов	Структура компонентов, %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	a_n , МДж/м ²
		МПа		%		
38Х2МЮА	0,35-0,42 С; 0,17-0,37 Si; 0,3-0,6 Mn; 1,35-1,65 Cr; 0,25 Ni	850	700	10	45	0,8
08кп	0,05-0,12 С; 0,17-0,37 Si; ≤0,035S; ≤0,04 P; 0,3-0,6 Mn;	330	200	33	60	0,5
ВТ-22	5,0 Al; 5,0 Mo; 5,0 V; 1,0 Cr; 1,0 Fe	1100-1250	850	9/6	25/16	0,3/0,2

Титановую композицию ВТ-22 относят к категории двухфазных «α+β» сплавов. Данная категория сплавов активно применяется в конструкциях самолетов и ракет.

Сталь 38ХМЮА – является хром-алюминиевой нитрируемой сталью. Ее термическая обработка (закаливание) осуществлялась при 950 градусах Цельсия, а процесс отпуска – при

650 градусов Цельсия. Данные стали применяются для производства шестеренок, различных валов, прочие. С целью увеличения стойкости к изнашиванию используется процесс нитрификации.

Стали 08-кп являются кипящими сталями и характеризуются умеренной прочностью и повышенными показателями гибкости. Используются, как правило, в слабонагруженных изделиях, активно применяются для холодного штампования.

Оценивание показывает, что покрытие TiN демонстрирует повышенную стойкость к износу, характеризуется близкими показателями линейных термических расширений к показателям линейных расширений конструкционной стали. Получается, что желаемые эксплуатационные параметры изделий могут быть достигнуты применением плазменного асистируемого напыления покрытий TiN.

Вместе с тем рассматриваемое покрытие имеет сравнительно малую прочность, относительно обрабатываемого материала, и характеризуется невысокими показателями стойкости к термическому воздействию. С целью повышения гибкости и стойкости к термическому воздействию покрытий в ряде работ предлагают использовать плазменные асистируемые напыления для создания многоуровневых покрытий по технологии Ti-TiN. При этом, применяемые в настоящее время покрытия, в общем случае характеризуются хрупкостью и низкой адгезией к подложкам, на которые они наносятся [14,15].

Измерение твердостей каждой нитрифицируемой поверхности выполнялось по методике, предложенной Виккерсом. Руководствуясь этой методикой в процессе испытания изделия, алмазные наконечники вдавливаются в испытуемые участки при нагрузках P (от 0,049 до 4,9 Н). По завершению испытания измеряется длина d следа на корпусах испытываемых образцов. Твердость HV (Па) выражаются соотношением нагрузок P к площадям оставленных следов в виде следующего выражения:

$$HV = \frac{2 \cdot P \cdot \sin(\alpha / 2)}{d^2} 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

где P – является текущей нагрузкой, Н;

α соответствует 135° и является углом между противоположными сторонами пирамиды;

d – является усредненным показателем длины оставленного следа по завершении нагружения, мм.

Эффективные характеристики слоев устанавливались посредством кривых, описывающих распределение твердостей к величинам твердостей не нитрифицированных материалов.

Представляет интерес вариант, в котором длины ионных проходов в металлах превышают дистанции от пустотелых катодов до заготовок. Наличие такого эффекта будет наблюдаться для давлений $p < 4 \cdot 10^{-2}$ Па и дистанций от катодов r меньших, чем 190 миллиметров. Предположим, поверхности рабочих элементов статичны. В таком случае будет выполняться требование, когда β будет тождественно φ . Внешний вид структуры рассматриваемого процесса отображается рисунком 1.

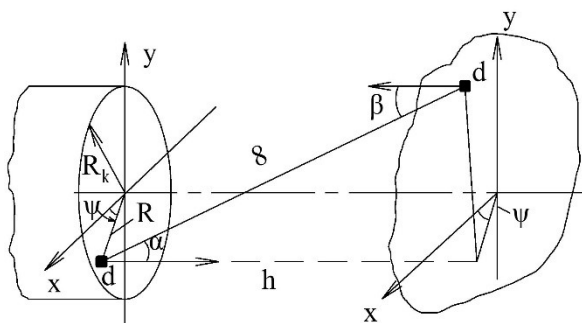


Рисунок 1 – Схема ионного плазменного осаждения покрытия.

Характеристики потоков, генерируемых пустотелыми катодами dS_2 около поверхностей dS_1 , рассчитывается по соотношению:

$$d_{j_{r,\varphi}} = j_D \frac{dS_2 h^2}{\pi r^4} \quad (2)$$

Ионные потоки рассчитаем интегрированием соотношения (2), то есть получается:

$$j_{r,\varphi} = \frac{j_0}{\pi} \int_0^R R dR \int_0^{2\pi} \frac{h^2 d\psi}{\left[h^2 + (x - R \cos \psi)^2 + (y + R \sin \psi)^2 \right]^2} \quad (3)$$

В данном случае j_0 – является характеристикой текущего потока на пустотелом катоде. Итог вычислений (4) выглядит так:

$$j_{r,\varphi} = \frac{j_0}{2} \left(1 + \frac{R_k^2 - h^2 - \rho^2}{\sqrt{(R^2 + h^2 + \rho^2) - 4R^2 \cdot \rho^2}} \right) \quad (4)$$

Величины ионных токов на катодах (j_0) можно выразить так:

$$j_0 = \frac{\mu_p \cdot J_\partial \cdot \bar{z}_e}{\pi \cdot m_i \cdot R_k^2} \quad (5)$$

поэтому:

$$j_{r,\varphi} = \frac{\mu_p \cdot J_\partial \cdot \bar{z}_e}{\pi \cdot m_i \cdot R_k^2} \left[1 + \frac{R^2 - h^2 - \rho^2}{\sqrt{(R^2 + h^2 + \rho^2)^2 - 4R^2 \cdot \rho^2}} \right] \quad (6)$$

в данном случае μ_p – является показателем, выражающим степень эрозий катодов.

Величины ионных потоков на каждой катодной оси определяются так:

$$j_{r,\varphi} = \frac{\mu_p J_p \bar{z}_e}{\pi m_i (R_k^2 + h^2)} \quad (7)$$

Имея данные об ионных токах и, учитывая особенности выполнения напыления, оценим продолжительность оседания покрытий:

$$V_k = \frac{m_i}{z_i \rho} \sum_{j=1}^n (S_k j_{r,\varphi} - S_p j_{r,\varphi})_j \quad (8)$$

$$T_n^4 = \frac{j_{r,\varphi} (\bar{W}_{i,r,\varphi} + \bar{z}_i u_n + Q_k + l \bar{U}_i)}{\delta \varepsilon_r \bar{z}_i} - T_{cm}^4 \quad (9)$$

где m_i – является весом накапливаемых ионов;
 δ – является константой Стефана-Больцмана;
 z_i – выражает средние ионные заряды;
 ε_r – описывает текущие интегральные показатели;
 S_k, S_p – являются показателями накопления;
 Q_k – это энергии накопленных ионов;
 \bar{W}_i – являются текущими мощностями ионов;
 U_i – это усредненные мощности ионизаций;
 ρ – веса накапливаемых соединений;
 e – выражает мощности электронов.

С учетом выражений (7), (8), а также (9) имеем:

$$V_k = \frac{\mu_p \cdot J_p \cdot \alpha_k}{\rho \cdot \pi \cdot (h^2 + R_k^2)} \quad (10)$$

Чтобы вычислить скорость оседания ионных плазменных покрытий, учитывая вращение заготовок, выполнена доработка упомянутой выше модели. Схема оседания ионного плазменного покрытия отображается рисунком 2. Ионные потоки будут изменяться сообразно изменению угла α , поэтому соотношение (11) будет выглядеть так:

$$j_{r,\varphi}(\alpha) = \frac{\mu_p \cdot I_\partial \cdot \bar{z}_i}{2\pi \cdot m_i \cdot R_k^2} \left[1 + \frac{R_k^2 - h^2 - b^2}{\sqrt{(R_k^2 + h^2 + b^2)^2 - 4R_k^2 \cdot b^2}} \right] \quad (11)$$

$$h = h_i + R_{cm} \cdot (1 - \cos \alpha)$$

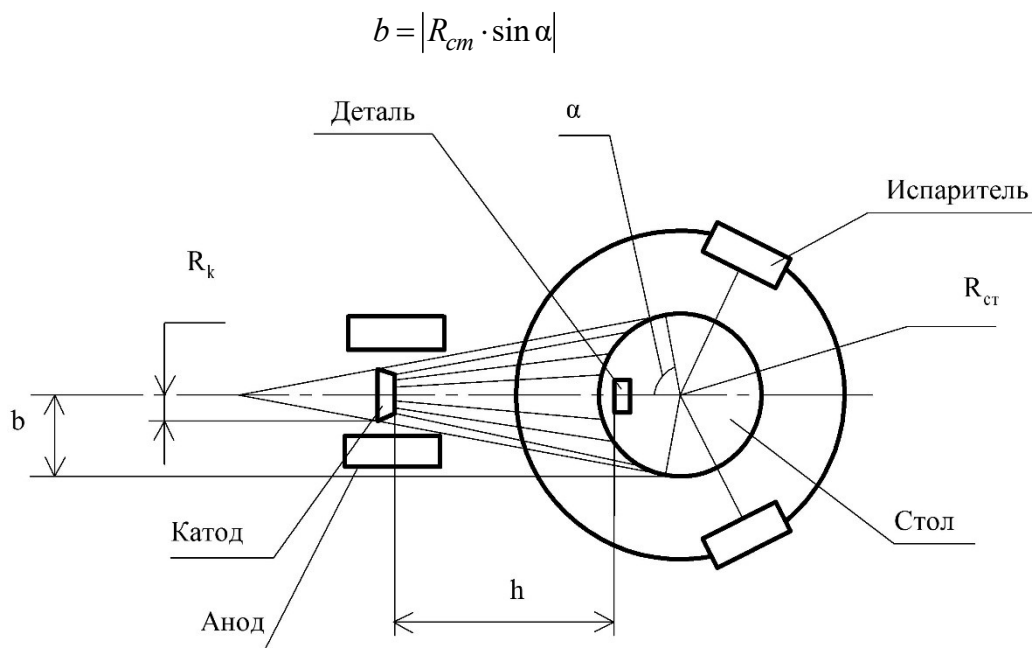


Рисунок 2 – Схема осаждения ионных плазменных покрытий при вращении заготовки.

Угол α выражается так:

$$\alpha = 6 \cdot n \cdot t \quad (12)$$

где n – количество вращений стола, обороты за минуту;
 t – является текущим временем операции, сек.

Скорость осаждения можно рассчитать так:

$$V_k(n) = \frac{m_i}{z_i \rho} \sum_{t=1}^{t=60} j_{r,\varphi}(n,t) \cdot (S_k - S_p) \quad (13)$$

Толщины слоев:

$$h_{сл} = V_k(n) \cdot t_{обр} \quad (14)$$

где $t_{обр}$ – продолжительность обрабатывания, мин.

Благодаря использованию созданной имитационной модели, посредством которой можно подбирать технологические параметры оседаний покрытия. Итоги вычислений проиллюстрированы рисунками 3, 4.

Оценка значений ширины каждого рентгеновского пика показывает, что при увеличении количества слоев, напряжения в покрытиях будут пропорционально снижаться. Данная специфика, присущая рассматриваемым покрытиям во многом обуславливает их повышенную стойкость к износу. Далее, с целью изучения защитных качеств покрытия выполнялось оценивание их эксплуатационных характеристик.

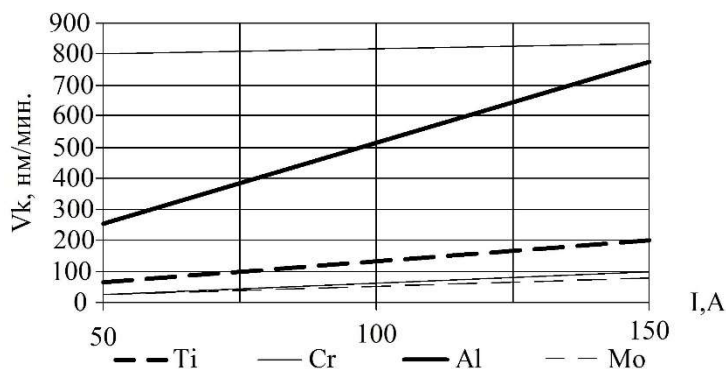


Рисунок 3 – Функции скоростей осаждения покрытий от токов дуги:
 ($n=2$ об/мин, $R_k=0,029$ м, $R_{ст}=0,14$ м, $h_1=0,26$ м)

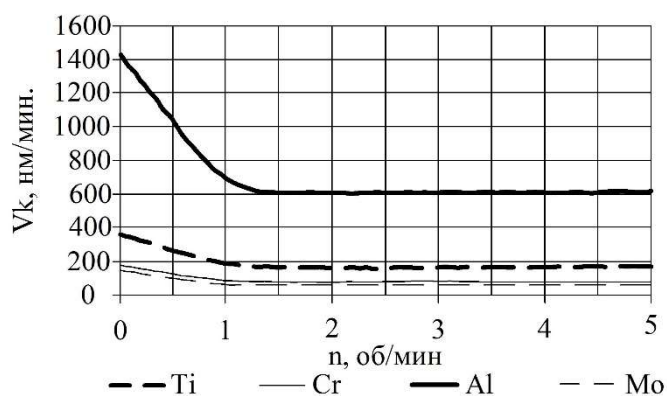


Рисунок 4 – Функции скоростей оседаний покрытий от оборотов:
 ($I_0=119$ А, $R_k=0,029$ м, $R_{cm}=0,14$ м, $h_1=0,26$ м)

Величина стойкости к эрозии и защитные характеристики покрытия выражаются частотными показателями эрозии после того, как образец выдерживался в емкости, имитирующей неблагоприятные климатические условия ($T = 42^\circ\text{C}$; влажность воздуха 95-97%) на протяжении 30 дней. В итоге было установлено, что масштабы поражения у изделия с одним покрытием значительно превышают таковые масштабы у изделия с многослойным покрытием (отображается рисунком 5).

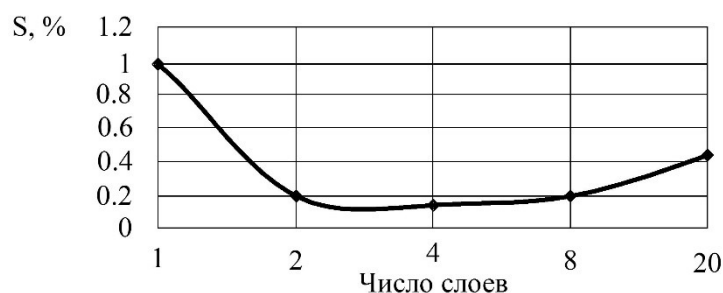


Рисунок 5 – Функции площадей эрозионного поражения изделия от количества слоев

С целью уточнения полученного результата выполнялась оценка поляризационных потенциалов стального образца, имеющего многоуровневые покрытия на базе Ti-TiN, которые нанесены с помощью плазменной ассистированной методики, а также образца, имеющего одноуровневое покрытие TiN, которое наносилось по стандартной методике (отображается рисунком 6).

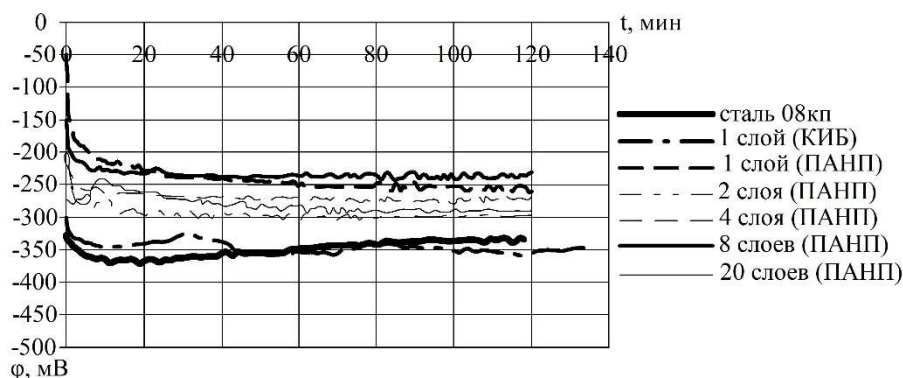


Рисунок 6 – Изменения поляризационных потенциала с течением времени

Таблицей 2 отображаются текущие энергетические величины рассматриваемых изделий, имеющих различные покрытия.

Получается, что при увеличении числа покрытий, величина $\phi_{кор}$ будет уходить к плюсовым значениям, в то время как у изделия, имеющего двадцати уровневое покрытие, $\phi_{кор}$ – перемещается к отрицательным значениям.

Таблица 2 – Значения установившихся энергетических величин.

Покрытие	Нет покрыт	TiN (КИБ)	TiN (ПАНП)	Ti-TiN 2 слоя	Ti-TiN 4 слоя	Ti-TiN 8 слоев	Ti-TiN 20 слоев
$\Phi_{кор}$, мВ	373,6	359,3	273,2	314,3	289,4	251,9	316,6

Оценивание изделий, имеющих одноуровневые покрытия TiN, показывает, что благодаря ПАНП обеспечивается большая степень защиты от эрозии, нежели демонстрируют изделия, имеющие покрытия по классической методике КИБ. Это можно объяснить меньшим накоплением фазы микроскопических капель, а также уменьшением напряжений в рассматриваемых покрытиях, что также описано в [13].

Более полную информацию об эксплуатационных характеристиках сталей 08-кп, имеющих покрытие на базе Ti-TiN предоставляют кривые поляризации. Рисунком 8 отображается ряд кривых, описывающих характеристики изделий, имеющих различные варианты покрытия.

Рисунком 7, например, показывает, что стали 08-кп ускоренно растворяются. Так, в ходе напыления TiN основанного на обычной методике КИБ, анодные растворения начинаются на фоне плюсовых величин ϕ , то есть 1-уровневые покрытия TiN замедляют процесс эрозии, в то время как при плюсовых величинах ϕ изделия с 1-уровневыми покрытиями начинают ускоренно растворяться.

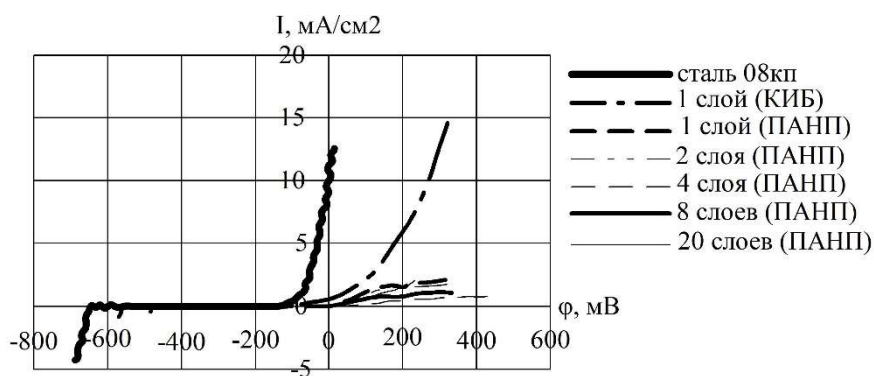


Рисунок 7 – Внешний вид кривых поляризации стальные изделия с покрытиями системы Ti-TiN

В то же время совсем другая ситуация возникает с изделиями, имеющими 1-уровневые покрытия TiN и многоуровневые покрытия системы Ti-TiN, где количество слоев два, четыре, восемь и двадцать, которые наносились по плазменной ассистированной методике. Визуальное наблюдение показало, что 2%-ная водная смесь NaCl, являющаяся индикатором состояния изделий без покрытий, а также изделий, имеющих 1-уровневое покрытие, получает желтоватый оттенок, а исследуемые изделия покрываются коррозионными доменами.

Для оценки характеристик стойкости покрытия на базе Ti-TiN под влиянием остаточных напряжений в изделии, имеющем покрытие, изделие подвергалось деформированию до 19-21% (изделия нагревались в муфельных печах). Рисунком 8 отображаются кривые, описывающие зависимости каждого эрозионного потенциала от временного интервала.

Получается, что поляризационный потенциал изделия, имеющего покрытие, после деформирования будет стремиться к плюсовым величинам. Это можно объяснить формированием на поверхностях каждого деформируемого изделия оксидных пленок, сформировавшихся на изделиях при их нагревании в процессе деформирования.

Величины установленного поляризационных потенциалов отображаются таблицей 3.

Получается, что наилучшая защита от влияния различных напряжений и коррозии обеспечивается именно многоуровневыми покрытиями. Рисунком 9 отображается ряд кривых поляризации, описывающих поведение изделий, пребывающих под влиянием остаточного напряжения.

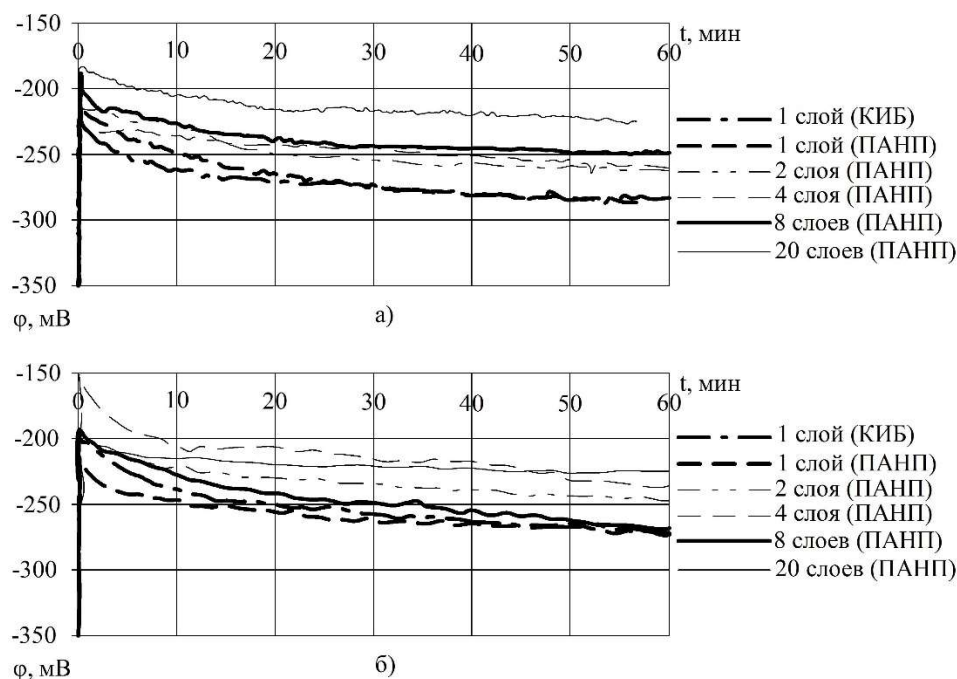


Рисунок 8 – Изменения поляризационных потенциалов изделий, имеющих покрытия системы Ti-TiN под влиянием остаточного напряжения

Таблица 3 – Значения поляризационных потенциалов.

Покрытия	TiN (КИБ)	TiN (ПАНП)	Ti-TiN два слоя	Ti-TiN четыре слоя	Ti-TiN восемь слоев	Ti-TiN двадцать слоев
Имеющих остаточные напряжения при растяжении	-282,0	-284,0	-259,1	-257,0	-247,3	-221,5
Имеющих остаточные напряжения при сжатии	-272,0	-272,7	-246,3	-234,9	-267,3	-227,7

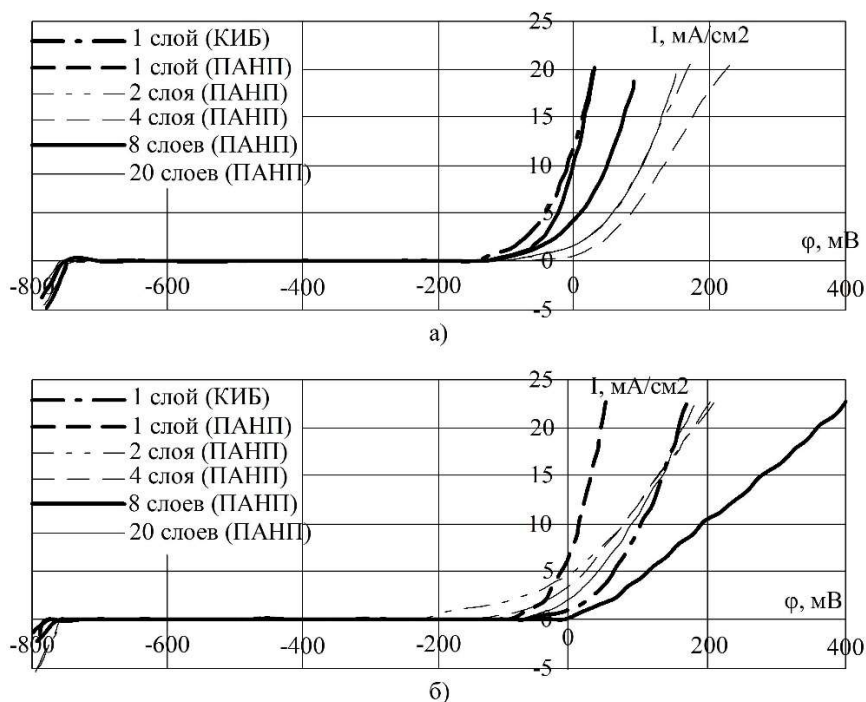


Рисунок 9 – Внешний вид кривых поляризации, описывающих поведение изделий, имеющих покрытие системы Ti-TiN, пребывающих под влиянием остаточного напряжения

Оценивание каждой представленной кривой показывает, что скорости коррозии под воздействием того или иного напряжения будут повышаться, причем для всех изделий, имеющих одноуровневые покрытия. В то же время у изделий, имеющих двух, четырех и восьми уровневые покрытия скорости износа будут меньшими, нежели у изделий, имеющих 1-уровневые покрытия. Вместе с тем у двадцати уровневых покрытий эти скорости будут выше, чем у 2, 4 и 8 слойных, из-за ухудшения сплошности площади покрытия при переходе к размеру слоя менее 0,5 мкм.

Стоит так же заметить, что влияние на одноуровневое покрытие TiN остаточного напряжения характеризуется рядом преимуществ, присущих плазменному ассистированному способу напыления [13]. Для изучения этих преимуществ применялся метод качественных испытаний, состоящий в повторении многократного нагрева и охлаждения до момента, пока не наступит разрушение исследуемых покрытий. Изучение степени воздействия внешних факторов на показатели стойкости к термическому воздействию показало, что устойчивость покрытий к влиянию высоких температур должна повышать коэффициенты термических расширений покрытий, способствовать увеличению теплопроводностей, а также препятствовать истончению покрытий. Вместе с тем позитивная роль данных факторов будет наблюдаться лишь тогда, когда не будут снижаться иные ключевые качества покрытия. Таблицей 4 отображаются итоги оценивания термического циклирования изделий, имеющих многоуровневые покрытия на базе Ti-TiN.

Следовательно, многоуровневое покрытие имеет большую термостойкость, нежели одноуровневое. Большие термостойкости многоуровневых покрытий относительно одноуровневых можно объяснить наличием меньших остаточных напряжений в многоуровневом покрытии, что, собственно, и обуславливает повышение механических характеристик системы «покрытие-подложка», которые играют ключевую роль при термоциклировании.

Таблица 4 – Число повторений, необходимых для существенного деформирования изделий при проведении термического циклирования.

Наименование покрытия	TiN	Ti-TiN 2 сл.	Ti-TiN 4 сл.	Ti-TiN 8 сл.	Ti-TiN 20 сл.
Численность повторений	480	720	>1000	>1000	>1000

Анализ и обсуждение технологии.

Обеспечение ряда требований, предъявляемых к рабочим поверхностям регулирующей арматуры, достигается применением специальных функциональных покрытий. При этом, многие варианты покрытий характеризуется повышенными показателями хрупкости и низкой адгезией к обрабатываемому материалу. Регулирующая арматура подвергается нагреванию, которое длится около 9-14 секунд до температур 740-810 градусов Цельсия, а итогом напрессовывания становится то, что покрытия нередко откалываются и отслаиваются, что становится причиной отбраковки изделий.

Благодаря замене хрупких покрытий на глубоковакуумные плазменные ассистированные напыления многослойными покрытиями системы Ti-TiN имеется возможность повышения эксплуатационных характеристик, причем в несколько раз, утонение покрытий уменьшится с $h=7\pm 1,5$ мкм до $h=3\pm 1,1$ мкм, уменьшится также себестоимость напыления покрытий.

Глубоковакуумное ионное плазменное осаждение защитных покрытий отличается экологичностью, так как не происходит загрязнения почв соединениями, включающими тяжелые металлы, а также повышается степень производственного комфорта. Создание таких производственных участков потенциально может обеспечить серийное производство регулирующей арматуры, имеющую ионное плазменное покрытие на базе Ti-TiN.

Проиллюстрированная рисунком 10 технологическая цепочка плазменного ассистированного напыления покрытий системы Ti-TiN включает следующие стадии:

- химическую очистку изделия;
- загрузки изделий в специальные камеры;

- очистку изделий;
- операцию плазменного ассистированного нанесения покрытий системы Ti-TiN;
- операцию охлаждения изделия в глубоковакуумной камере.



Рисунок 10 – Схема технологического процесса по плазменному ассистированному напылению многоуровневых покрытий системы Ti-TiN

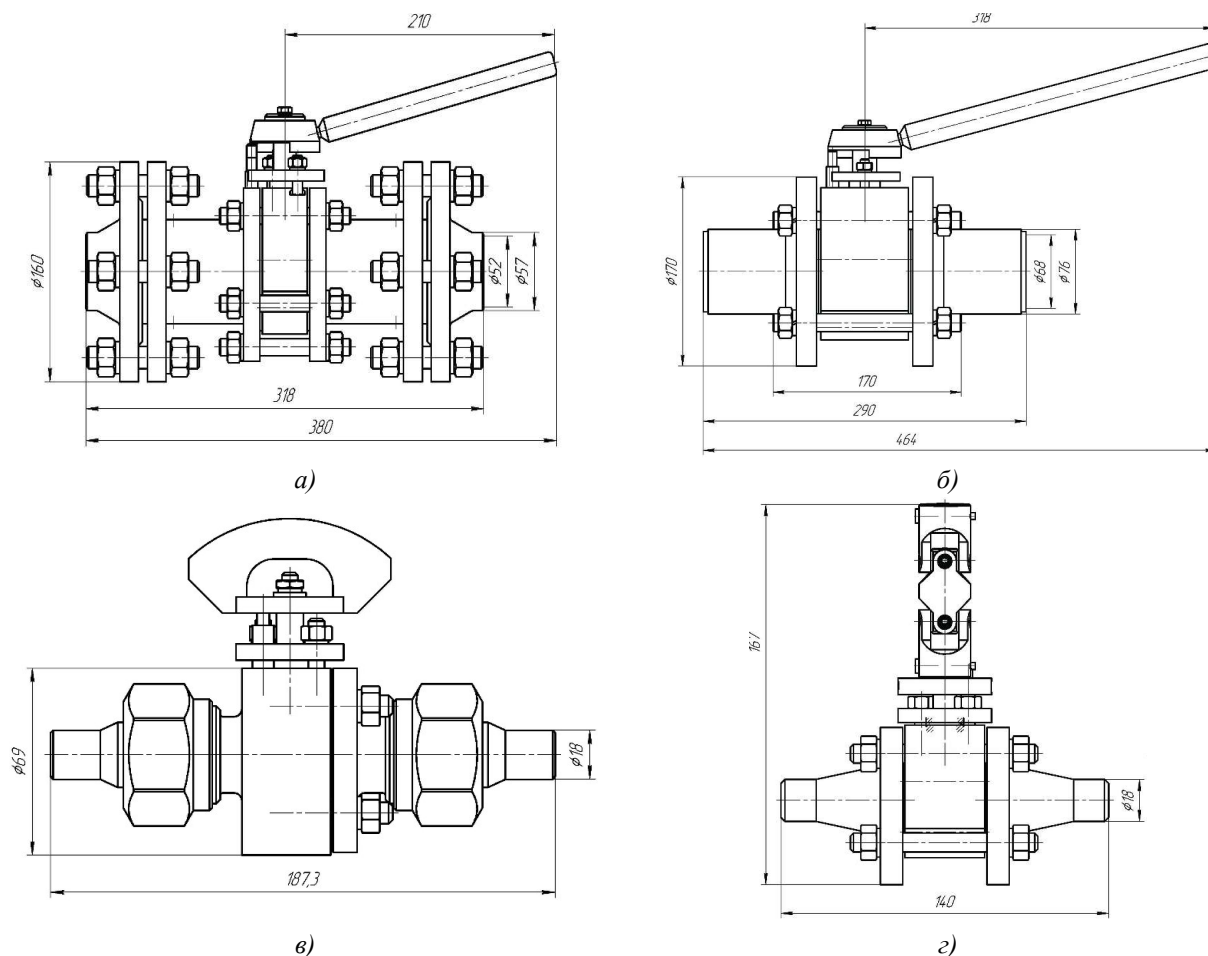


Рисунок 11 – Исполнения в модельном ряде регулирующей арматуры:
а) – фланцевое; б) – приварное исполнение; в) – штуцерно-нипельное; г) – муфтовое

Очистка изделия заключается в удалении видимого слоя загрязнений, которые могут включать массу органических веществ, таких как масла, смазки, жировые соединения. Для очистки применяют этиловые спирты. Далее следует ионное очищение электрическими разрядами в инертном газе под давлением $5,15 \cdot 10^{-2}$ Па. Величина напряжения при этом составляет 980 Вольт в течение трех минут.

Далее производится операция плазменного ассистированного напыления многоуровневого покрытия системы Ti-TiN. Процесс выполняется посредством пары электрических испарителей под давлением 0,129 Па и потенциалах подложек 118 В.

Осаждение покрытия, как правило, протекает при токах в 9-11 Ампер. Многоуровневые покрытия включают ряд соединений: в процессе напыления слоев чистым титаном применялся аргон, в то же время для напыления титановых соединений – был использован азот [16].

Суммарная продолжительность напыления составляла около 35 мин., а длительность напыления конкретного покрытия определялась количеством слоев. Так, в ходе напыления восьмиуровневых покрытий длительность напыления 1-го слоя составляла около 5 мин.

Рисунком 11 отображается внешний вид регулирующей арматуры, имеющей многослойное покрытие системы Ti-TiN.

Заключение

Проведено исследование методики осаждения многослойных покрытий системы Ti-TiN на рабочие поверхности регулирующей арматуры. В общем случае процесс состоит в том, что система из обрабатываемой заготовки, пребывающей под минусовыми потенциалами, обрабатывается потоком плазмы, имеющей увеличенную плотность ионов, что открывает возможность повышения скорости обработки в несколько раз относительно обработки в тлеющем разряде, выполняемой посредством обычного, а не полого катода. Оценивались показатели поляризационных потенциалов в газе Ar, N₂ и смеси 30%Ar-45%N₂-30%C₂H₂. Отмечено, что использование газовой смеси открывает возможность повышения характеристик покрытия на 45-65% по сравнению с использованием очищенного азота.

Показано, что процесс обработки в тлеющем разряде в очищенном азоте будет малоэффективным для стали. Насыщение азота ацетиленом и аргоном позволяет лучше насыщать стали, причем как при обрабатывании в тлеющем разряде, так и посредством повышенных описанной в статье методики. В частности, операция обработки титанового сплава открывает возможность увеличения поверхностной твердости в 2,3-2,5 раза.

Показано, что многослойное покрытие системы Ti-TiN, полученное по методике плазменного ассистированного напыления включает фазы α -Ti, а также TiN, характеризующиеся микротекстурой различной направленности, что обуславливает повышение эксплуатационных характеристик итоговых изделий в 3-4 раза, а также стойкости к тепловому воздействию в 2 раза относительно монослойного титанового покрытия. Предложенная технология плазменного ассистированного напыления многоуровневого покрытия позволяет снизить затраты на проведение этой операции на 35-38% относительно стандартной технологии.

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.: Металлургическая отрасль, 1985 год. -255 с.
9. Лебединский О.В., Костржицкий 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. Клубникин 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/ITQMSIS53292.2021.9642718. – 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. 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 α -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 karakteristik 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 nizkotemperaturnyh 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 elektronnoho 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 napolnennyh 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 metallicheskih materialov: Uchebnoe posobie dlya vysshih uchebnyh zavedenij po specialnosti «Materialovedenie, oborudovanie i tekhnologii termicheskoy 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, predstavlennyh 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 medlennyh razryadah. -M.: Atomizdat, 1974 god-174 s.
13. Rahimov A.S., Velihov E.P., Kovalev A.S., Ryad fizicheskikh i himicheskikh yavlenij nablyudaemyh v gazorazryadnyh 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

© A. A. Татарканов, 2024

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.

Введение.

Углеродное волокно (УВ) - химический материал, состоящий на 99,9 % из углеродных нитей с прочностью на разрыв ($\sigma \approx 5-6$ ГПа) и модулем упругости ($E \approx 400-550$ ГПа), низкой плотностью ($\rho \approx 1,6-1,9$ г/см³) и химической инертностью.

Основной областью применения УВ является производство композиционных материалов (КМ) в которых в сочетании с полимерными, керамическими или металлическими матрицами (связующими) получают композиционные материалы с различными механическими характеристиками.

Состав и свойства углерод - углеродных композитов.

Углеродная матрица образуется в результате пиролиза полимерного связующего углепластика при температурах около 900° С в инертной атмосфере. В результате такой обработки полимерное связующее превращается в твердый кокс. Другая составляющая углерод - углеродных композитов - углеродный наполнитель.

Для материалов с углеродной матрицей применяются фенолформальдегидные, полиимидные, кремнийорганические полимеры и их модификации.

Наполнителями для материалов углерод- углерод являются ткани УУТ-2/4, УВМ-10, УВМ-4 с содержанием углерода 93-98%, ВГ-4, ВГМ-4, ВГМ-10 с содержанием углерода 97-98%. Химический состав волокна, характеристики окислительной стойкости тканей приведены в таблице 1,2 [1,2].

Таблица 1 - Химический состав волокна в тканях

Ткань	Содержание, % (по массе)		
	С	Н	Зола
ВГМ-4	99,6	0,115	0,325
ВГМ-10	99,1	0,12	0,75
ТГН-2М (ТКК-5)	98,9	0,12	0,9
ВГ-4	98,05	0,051	1,9
«Урал»	99,7	0,114	-

Таблица 2 - Характеристики термоокислительной стойкости тканей

Ткань	Остаток неразложившегося вещества, %, при 1000°С	Начальная температура разложения Т _с , °С	Температура, °С, потери массы, %		Температура максимального разложения, °С
			5	10	
ВГМ-4 (с покрытием)	62	600	730	770	-
ВГМ-4	53	410	590	660	770
«Урал»	49,7	420	570	650	740
ТКК-2	51,4	480	585	640	690
ТКК-5	48,6	470	595	645	685

Из данных таблиц 1,2 преимущество имеют ткани ТКК-2 Урал.

При разработке углерод - углеродных композитов целесообразно использование фенолформальдегидных смол (ЛБС-1ФН) полиимидной (СП97), кремнийорганической (К2104) (таблица 3,4, рисунок 1) [3,4].

Таблица 3 - Характеристики твердых остатков полимерных связующих

Связующие		Прочность при сжатии, $\sigma_{в.сж}$, МПа	Динамический модуль упругости E , ГПа	Потери массы, %, при 1000°С* в воздушной среде за 15 мин
Тип	марка			
Фенолформальдегидное	ФН	25	50	41,0
	БСЛ	21	40	42,0
Полиимидное	СП-97	26	40	51,0
Модифицированное фенолформальдегидное	ФКФ	32	60	10,0
Кремнийорганическое	К-101	3	70	18
	К-2104	5	70	2,0
Фенолкремнийорганическое	ТКС	5	70	20,0

*Нагрев до 1000°С со скоростью 20°С/мин.

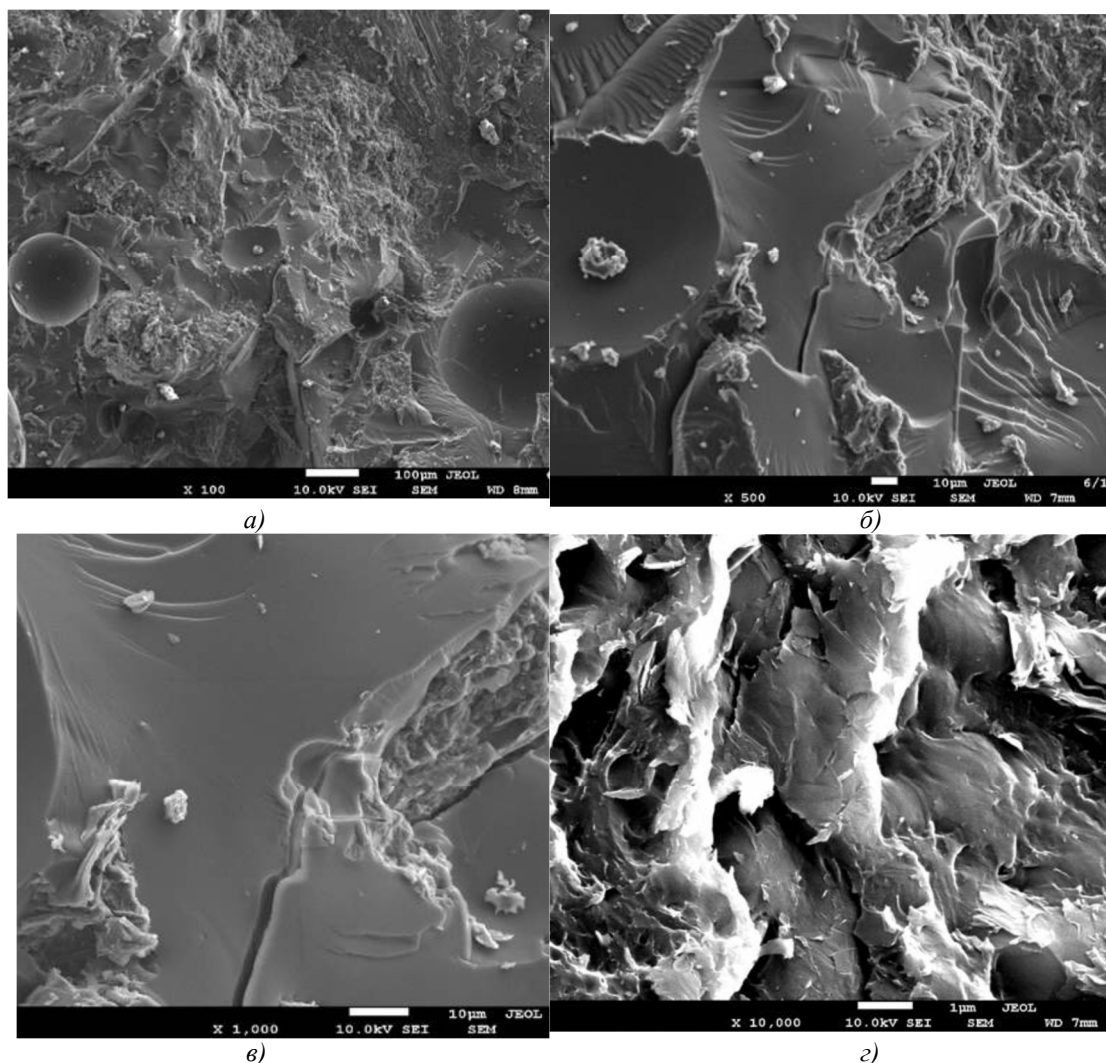


Рисунок 1 – Микроструктура образцов состава «графит – смола» (40% – 60%) при увеличениях: а) – 100х; б) – 500х; в) – 1000х; з) – 10000х;

Покрyтия на основе SiC из газовой фазы увеличивает термоокислительную стойкость тканей (рисунок 2, таблица 5) [5,6].

Анализ таблиц 3,4 показывает предпочтительность применения связующего БСД-1 и ФН для разработки углерод - углеродных материалов. Заполнение пор в пиролизованном углепластике проводится путем карбонизации (1000-1050°С) пропитки под давлением фенолформальдегидным связующим ФН.

Таблица 4 - Прочность углерод-углеродных материалов при высоких температурах

Связующее	Содержание, %		Прочность при изгибе, МПа, углерод-углеродного материала при температуре, °С		
	связующего	пироуглерода	20	900*	1500*
ФН	43,2	12,4	117	48	0
БСЛ	40,1	13,2	104	42	0
СП-97	40,2	11,7	108	43	0
К-101	38,4	15,2	84	41	3
ТКС	39,4	17,3	118	56	2
К-2104	44,0	14,2	93	50	15
ФКФ	41,2	12,3	110	74	28

*Выдержка при высокой температуре в окислительной среде в течение 30 мин.

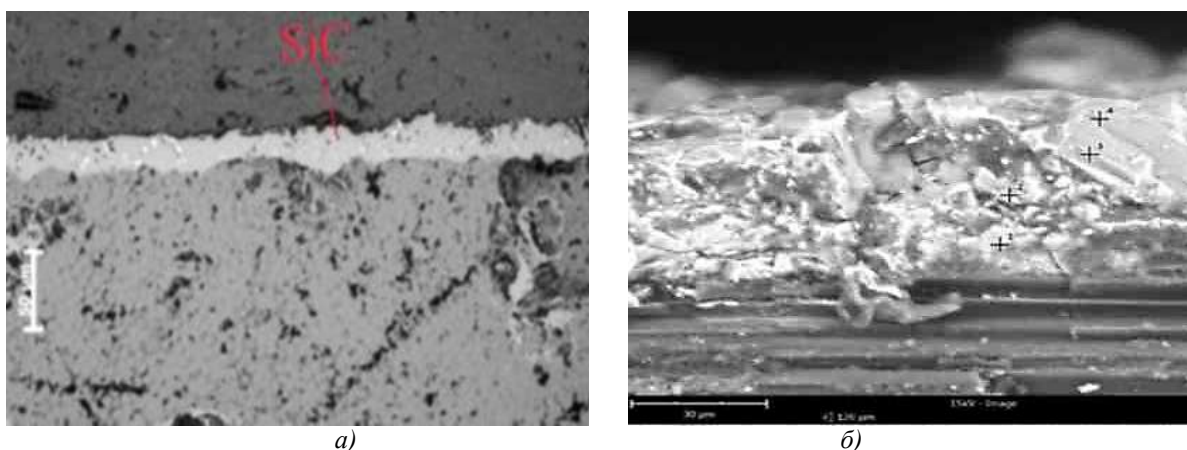


Рисунок 2 - Микроструктуры покрытий SiC (500^x), полученных при температурно-временном режиме: а) -1850 °С, 25 мин; б) -1950 °С, 20 мин (метки 1,2,3,4- снизу- вверх)

Таблица 5 - Массовые концентрации углерода и кремния в покрытии SiC в точках, отмеченных на рисунке 2б

Элемент	Концентрация в точках, мас. %			
	1	2	3	4
Si	69,7	61,6	57,3	59,9
C	30,3	38,4	42,7	40,1

Углеродные нанотрубки.

Одним из перспективных способов регулирования (увеличения) адгезионной прочности является модифицирование УВ различными наноструктурами (рисунок 3) [6].

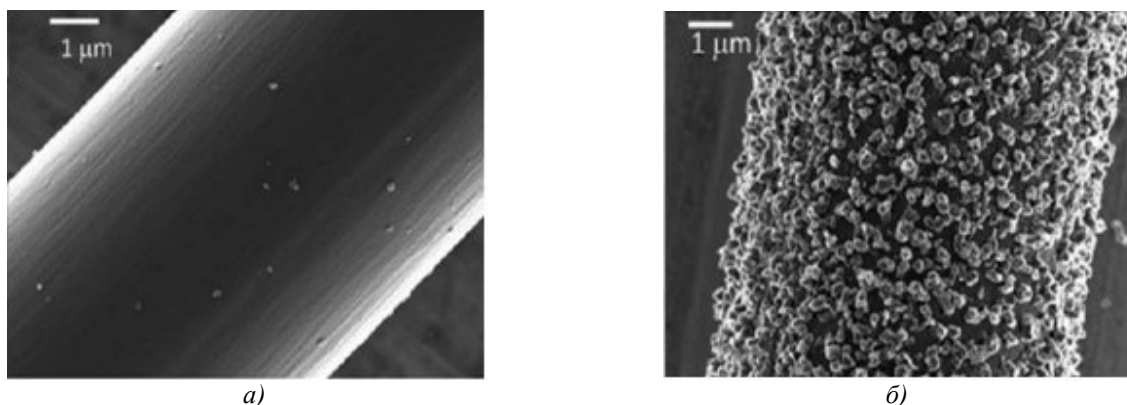


Рисунок 3 - Морфология поверхности УВ: а – после нанесения частиц катализатора напылением; б – после образования углеродных наноструктур

Метод осаждения катализатора определяет распределение и плотность получаемых углеродных нанотрубок (УНТ). При магнетронном распылении катализатора получается более плотное покрытие (рисунок 4, а) чем при электрохимическом осаждении (рисунок 4,б).

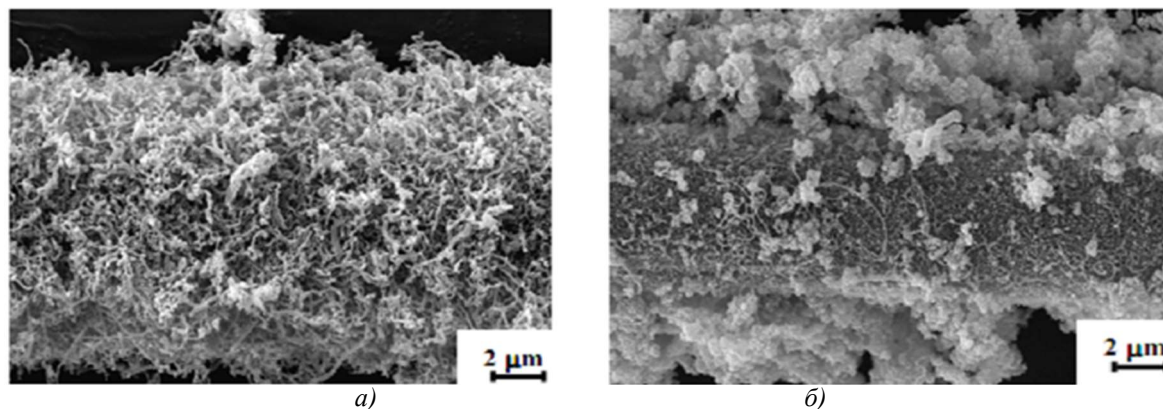


Рисунок 4 - Изображения филамента УВ с УНТ, полученными при магнетронном распылении катализатора(а), осажденном из газовой фазы (б)

Всевозможные поверхностные обработки УВ для повышения их адгезионного взаимодействия с полимерными матрицами повышают коэффициент реализации прочности до 50–55 %.

Математические методы прогнозирования структуры и свойств композита.

В качестве модели пространственно-армированного композита используется двухуровневая модель неоднородной среды, составленной из элементарных объемов [7,8,9].

Пространственное распределение направлений армирования волокнами удобно задавать в общем случае с помощью плотности распределения $f(\varphi, \gamma)$ сферических углов φ и γ , которые определяют положение оси волокна в лабораторной системе координат (рисунок 5).

Плотность $f(\varphi, \gamma)$ удовлетворяет следующему условию нормировки:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma = 1 \quad (1)$$

Если имеет место непрерывное равновероятное распределение волокон в композите, то соответствующая плотность распределения сферических углов $f(\varphi, \gamma)$ имеет следующий вид:

$$f(\varphi, \gamma) = \frac{1}{2\pi} \sin \gamma \quad (2)$$

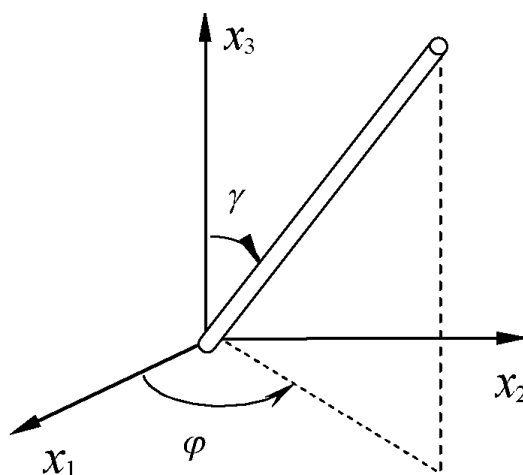


Рисунок 5 - Задание ориентации линейных волокон с помощью сферических углов

При равномерном (аксиально-симметричном) распределении волокон в плоскости вокруг оси Ox_3 :

$$f(\varphi, \gamma) = \frac{1}{2\pi} \delta\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

В случае равномерного распределения прямолинейных волокон по конической поверхности около направления оси Ox_3 при постоянном угле θ между осью и образующими плотность распределений имеет вид:

$$f(\varphi, \gamma) = \frac{1}{2\pi} \delta(\gamma - \theta) \quad (4)$$

Если волокна распределены равномерно внутри конической поверхности с углом θ между осью Ox_3 и образующими, то:

$$f(\varphi, \gamma) = \frac{\sin \gamma}{2\pi(1 - \cos \theta)}, \quad 0 \leq \gamma \leq \theta \quad (5)$$

В случае, когда прямолинейные волокна в композите ориентированы по нескольким дискретным направлениям функцию $f(\varphi, \gamma)$ можно представить в виде:

$$f(\varphi, \gamma) = \sum_k p_k \delta(\varphi - \varphi_k) \delta(\gamma - \gamma_k) \quad (6)$$

где φ_k и γ_k – углы Эйлера, задающие соответствующее направление армирования.

Непрерывные криволинейные волокна можно эквивалентно в рамках данного подхода описать распределением направлений касательных к их осям. Так для криволинейного волокна плетения, расположенного вдоль оси Ox_3 в плоскости Ox_1x_3 , при моделировании таких волокон дугой окружности радиуса r и длиной хорды l , имеем:

$$f(\varphi, \gamma) = \frac{\delta(\varphi)}{2\pi(1 - \cos a)}, \quad 0 \leq \gamma \leq a, \quad \text{где } a = \arcsin(l/2r) \quad (7)$$

В случае волокон имеющих вид спирали вдоль оси Ox_3 , поскольку угол между касательной к оси волокна и осью спирали постоянен, функция $f(\varphi, \gamma)$ соответствует равномерному распределению волокон по конической поверхности (4) с углом $\theta = \arcsin(h/2\pi r)$, где h – шаг спирали, а r – ее радиус.

Возможны случаи, когда в композите присутствуют волокна, как с непрерывным, так и с дискретным распределением в пространстве, а также различные системы прямых и криволинейных волокон одного типа. Такой пространственно-армированный материал может быть описан функцией плотности распределения углов, которая является взвешенной суммой функций плотности распределения углов $f_k(\varphi, \gamma)$ всех базовых компонент p_k с точностью до условия нормировки (2.1):

$$f(\varphi, \gamma) = \sum_k p_k f_k(\varphi, \gamma) \quad (8)$$

Соотношения теории армирования.

На этапе осреднения жесткостей элементарных объемов для композита, обладающего ортотропной симметрией механических свойств, можно ввести шесть параметров армирования, которые определяются как средние значения направляющих косинусов второй и четвертой степени:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \langle q_{12}^2 \rangle, \Delta_2 = \langle q_{23}^2 \rangle, \Delta_3 = \langle q_{33}^2 \rangle \\ \Delta_4 &= \langle q_{13}^4 \rangle, \Delta_5 = \langle q_{23}^4 \rangle, \Delta_6 = \langle q_{33}^4 \rangle \end{aligned} \quad (9)$$

где q_{ij} – элементы матрицы поворота элементарного объема относительно лабораторной системы координат.

Из шести параметров армирования независимыми являются только пять, так как в силу условия ортогональности действительно следующее тождество:

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \equiv 1 \quad (10)$$

Если известна функция распределения $f(\varphi, \gamma)$, то в общем случае параметры армирования могут быть определены с помощью следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \varphi \sin^2 \gamma f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma, & \Delta_4 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^4 \varphi \sin^4 \gamma f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma, \\ \Delta_2 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi \sin^2 \gamma f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma, & \Delta_5 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^4 \varphi \sin^4 \gamma f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma, \\ \Delta_3 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \gamma f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma, & \Delta_6 &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^4 \gamma f(\varphi, \gamma) d\varphi d\gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

В $\begin{smallmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{smallmatrix}$ случае, когда волокна в композите ориентированы по нескольким дискретным направлениям (4), параметры армирования могут быть заданы следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \sum_k p_k \cos^2 \varphi_k \sin^2 \gamma_k & \Delta_4 &= \sum_k p_k \cos^4 \varphi_k \sin^4 \gamma_k \\ \Delta_2 &= \sum_k p_k \sin^2 \varphi_k \sin^2 \gamma_k & \Delta_5 &= \sum_k p_k \sin^4 \varphi_k \sin^4 \gamma_k \\ \Delta_3 &= \sum_k p_k \cos^2 \gamma_k & \Delta_6 &= \sum_k p_k \cos^4 \gamma_k \end{aligned} \quad (12)$$

Предлагаемый подход так же позволяет аналитически определить значения параметров армирования для системы криволинейных волокон.

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{1}{L} \int_{(l)} \left(\frac{dx_1}{dl} \right)^2 dl & \Delta_4 &= \frac{1}{L} \int_{(l)} \left(\frac{dx_1}{dl} \right)^4 dl \\ \Delta_2 &= \frac{1}{L} \int_{(l)} \left(\frac{dx_2}{dl} \right)^2 dl & \Delta_5 &= \frac{1}{L} \int_{(l)} \left(\frac{dx_2}{dl} \right)^4 dl \\ \Delta_3 &= \frac{1}{L} \int_{(l)} \left(\frac{dx_3}{dl} \right)^2 dl & \Delta_6 &= \frac{1}{L} \int_{(l)} \left(\frac{dx_3}{dl} \right)^4 dl \end{aligned} \quad (13)$$

Методика оценки упругих свойств пространственно-армированных композитов.

Как правило, анизотропию упругих свойств материала связывают с изменением модуля Юнга от направления. При известных значениях компонентов тензора податливости S_{ijkl}^* в используемом матричном обозначении в плоскости Ox_1x_2 эта зависимость определяется соотношением:

$$E^{-1}(\alpha) = S_{11} \cos^4 \alpha + S_{11} \sin^4 \alpha + (S_{66} + S_{12}) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \quad (14)$$

где α – угол между направлением растяжения и осью Ox_1 .

Угловая зависимость коэффициента Пуассона в таком случае находится из выражения:

$$\nu(\alpha) = - \frac{S_{12} + (S_{11} + S_{22} + 2S_{12} + 2S_{66}) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha}{S_{11} \cos^4 \alpha + S_{22} \sin^4 \alpha + (2S_{11} + 2S_{66}) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha} \quad (15)$$

Следующее соотношение позволяет построить указательную поверхность модуля Юнга – зависимость E от направления растяжения в сферических координатах, наглядно изображающую анизотропию упругих свойств композиционного материала:

$$\begin{aligned} E^{-1}(\varphi, \gamma) &= S_{11} \cos^4 \varphi \sin^4 \gamma + S_{22} \sin^4 \varphi \sin^4 \gamma + S_{33} \cos^4 \gamma + \\ &2(S_{66} + S_{12}) \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi \sin^4 \gamma + 2(S_{55} + S_{13}) \cos^2 \varphi \cos^2 \gamma \sin^2 \gamma \\ &+ 2(S_{44} + S_{23}) \sin^2 \varphi \cos^2 \gamma \sin^2 \gamma \end{aligned} \quad (16)$$

Также можно построить указательную поверхность модуля сдвига G при кручении анизотропного материала вдоль оси, определенной соответствующими сферическими координатами:

$$G^{-1}(\varphi, \gamma) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (S_{11} + \frac{1}{2}S_{55} + \frac{1}{2}S_{66})\cos^2\varphi\sin^2\gamma + \\ (S_{22} + \frac{1}{2}S_{44} + \frac{1}{2}S_{66})\sin^2\varphi\sin^2\gamma + \\ (S_{33} + \frac{1}{2}S_{44} + \frac{1}{2}S_{55})\cos^2\gamma - E^{-1}(\varphi, \gamma) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Можно определить коэффициент Пуассона анизотропной упругой среды так, чтобы он зависел только от направления растяжения:

$$\nu(\varphi, \gamma) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} E(\varphi, \gamma) \begin{bmatrix} (S_{11} + S_{12} + S_{13})\cos^2\varphi\sin^2\gamma + \\ (S_{21} + S_{22} + S_{23})\sin^2\varphi\sin^2\gamma + \\ (S_{31} + S_{32} + S_{33})\cos^2\gamma \end{bmatrix} \quad (18)$$

В сферических координатах это направление соответствует касательной к соответствующей параллели на поверхности единичной сферы с центром в начале координат:

$$\nu^n(\varphi, \gamma) = E(\varphi, \gamma) \begin{bmatrix} (S_{11} + S_{22} + 2S_{12} - 2S_{66})\cos^2\varphi\sin^2\varphi\sin^2\gamma + \\ S_{23}\cos^2\varphi\cos^2\gamma + S_{13}\sin^2\varphi\cos^2\gamma + S_{12}\sin^2\gamma \end{bmatrix} \quad (19)$$

Соответствующий коэффициент Пуассона выражается следующим образом:

$$\nu^M(\varphi, \gamma) = 1 - E(\varphi, \gamma) \begin{bmatrix} S_{11}\cos^4\varphi\sin^2\gamma + S_{22}\sin^4\varphi\sin^2\gamma + S_{33}\cos^2\gamma + \\ S_{13}\cos^2\varphi + S_{23}\sin^2\varphi + 2(S_{12} + S_{66})\cos^2\varphi\sin^2\varphi\sin^2\gamma \end{bmatrix} \quad (20)$$

В качестве примеров применения данной методики предлагаются результаты расчетов указательных поверхностей (индикатрис) деформационных характеристик (14 -20) двух модельных композитов (табл. 6, рисунок 6-7), армированных волокнами двух различных материалов: а) изображение структуры армирования (волокна бора – светлые, стекловолокно – темное); б) указательная поверхность модуля Юнга; в) указательная поверхность модуля сдвига при кручении; г) указательная поверхность коэффициента Пуассона измеренного по площадям; д) указательная поверхность коэффициента Пуассона измеренного вдоль параллелей; е) указательная поверхность коэффициента Пуассона измеренного вдоль меридианов.

Таблица 6 - Параметры армирования систем волокон модельных композитов

Модельный композит	Параметры армирования компонент	
	Волокна бора	Стекловолокно
№1. Полотняное плетение стекловолокна с волокнами бора со взаимным 45° искривлением (рисунок 6) Объемное наполнение – 45%	$\Delta_1=0.818; \Delta_2=0;$ $\Delta_3=0.182; \Delta_4=0.693;$ $\Delta_5=0; \Delta_6=0.057.$ доля волокон – 50%	$\Delta_1=0; \Delta_2=0.818;$ $\Delta_3=0.182; \Delta_4=0;$ $\Delta_5=0.693; \Delta_6=0.057.$ доля волокон – 50%
№2. Плетение с 90° искривлением стекловолокна вокруг волокон бора (рисунок 7) Объемное наполнение – 73%	$\Delta_1=0; \Delta_2=1;$ $\Delta_3=0; \Delta_4=0;$ $\Delta_5=1; \Delta_6=0.$ доля волокон – 26%	$\Delta_1=0.5; \Delta_2=0;$ $\Delta_3=0.5; \Delta_4=0.375;$ $\Delta_5=0; \Delta_6=0.375.$ доля волокон – 74%

Материальные константы компонентов композита приведены в таблице 7.

Использованные схемы армирования, включающие криволинейные волокна плетения и прямые волокна, показывают анизотропию характеристик композитов, зависящую как от материалов волокон, так и от геометрии их укладки, процентного содержания и степени наполнения.

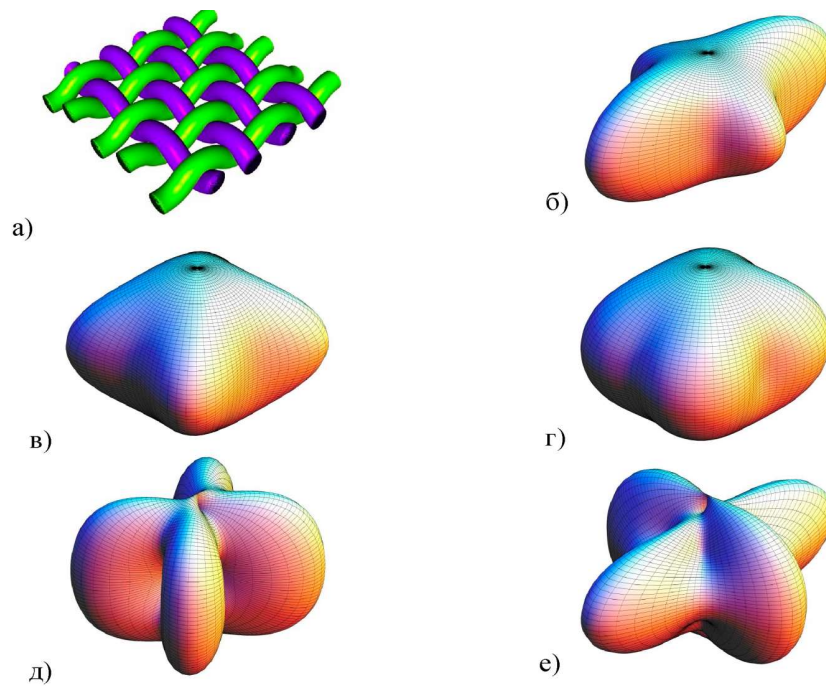


Рисунок 6 - Композит №1. Плотняное плетение стекловолокна с волокнами бора с взаимным 45°-искривлением

Таблица 7 - Материальные константы компонент модельных композитов

Компонент модельного композита:	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, г/см ³
борное волокно	400	0.2	2.6
стекловолокно	73	0.2	2.5
поливинилхлоридная матрица	3.91	0.4	1.2

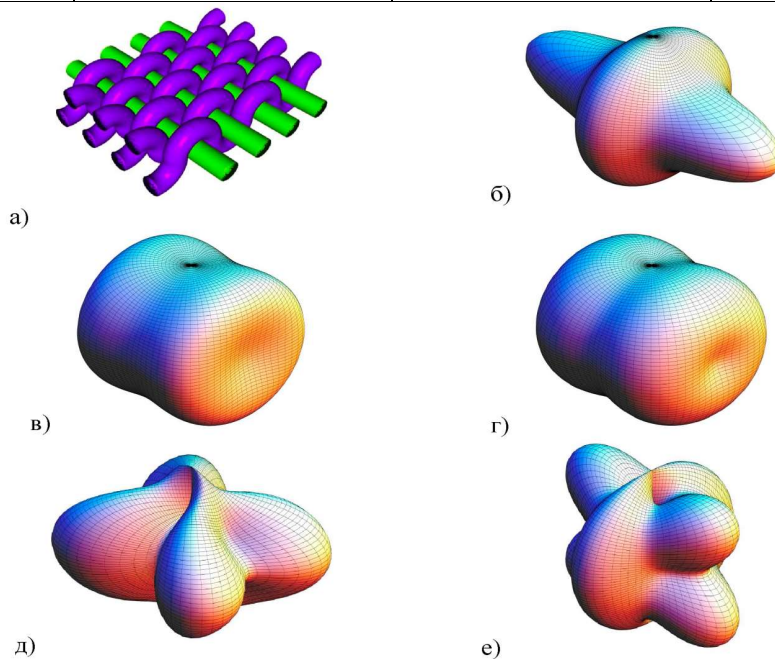


Рисунок 7 - Композит №2. Плетение с 90°-искривлением стекловолокна вокруг волокон бора

Выводы.

В сочетании с полимерными, керамическими или металлическими матрицами получают композиционные материалы с различными механическими характеристиками.

Используя метод осреднения показана зависимость анизотропии упругих характеристик композиционного материала от схемы армирования и объемного содержания волокон различных материалов.

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, Наугородское 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 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: mvsv4967@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.

Введение

Принцип автоматизированного оптимального проектирования опор роторов подразумевает получение в результате расчетов конфигураций с заранее заданными свойствами. Экспериментальная валидация расчетных результатов является важнейшим этапом в разработке комплексного методического аппарата для решения задач оптимального проектирования. Она может затрагивать целый ряд интегральных и динамических характеристик проектируемых опорных узлов [1-3].

Для триботронных опор (ТТО), отличающихся наличием системы управления [4,5], требуется контроль еще большего количества параметров, связанных с их способностью эффективно воздействовать на режимы работы роторной системы. Такие процедуры требуют как специализированного экспериментального оборудования [6-8], так и соответствующих методик проведения измерений.

Данная работа представляет результаты, полученные в рамках комплексного теоретико-экспериментального исследования по созданию методик и прикладных средств параметрического синтеза триботронных опор роторов [9-13]. В рамках апробации полученных методов была решена прикладная задача параметрического синтеза гидростатодинамического подшипника жидкостного трения [14,15]. В данной статье представлены разработанные экспериментальные системы и соответствующие методики исследований, изготовленных образцов активно смазываемых гибридных подшипников. Полученные в ходе экспериментов результаты использованы для анализа соответствия свойств образцов заданным в ходе проектирования. Сделаны выводы об адекватности разработанной для этого методической и инструментальной базы.

Цели проведения экспериментальных исследований

Целью первоначального оптимизационного расчета являлось получение геометрических конфигураций активного подшипника скольжения, обеспечивающих заданные свойства энергетической эффективности, динамические характеристики и управляющие параметры. В качестве целевых критериев для решения оптимизационной задачи дали выбраны момент трения подшипника, длительность переходного процесса и максимальное управляющее воздействие, которое может создать опора при приложении в две соседние камеры максимального давления смазочного материала, а в две другие – минимального. В процессе решения задачи параметрического синтеза был сделан вывод о необходимости улучшения целевого критерия, отражающего динамическое поведение роторной системы. Для улучшения адекватности расчетов динамики ротора была сформулирована сложная целевая функция, использующая в качестве основы помимо длительности переходного процесса декремент затухания колебаний [16]. Учет декремента затухания позволил снизить колебательность в динамическом поведении проектируемых роторно-опорных систем. Рассматриваемая целевая функция динамического поведения

построена на основе метода линейной свертки параметров. Также в рамках решения задачи параметрического синтеза был предложен вариант перехода от решения многокритериальной задачи к однокритериальной постановке на основе того же метода линейной свертки целевых критериев. Весовые коэффициенты в предложенном решении составили $\omega_i = [0.45 \ 0.45 \ 0.1]$. Геометрические параметры рассчитанных конфигураций ТТО, а также значения целевых функций приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики рассматриваемых ТТО.

Параметр	Вар.1	Вар.2	Вар.3	Вар.4
Момент трения T_{fr} , Н·мм	18,1	9,7	10,2	8,7
Длительность переходного процесса T_{tr} , мс	6,5	132	16,4	13,4
Максимальная управляющая сила R_{max} , Н	1010	492	411	127
Длина подшипника L , мм	67	34	36,7	30,8
Радиальный зазор h_0 , мкм	69	68	67,5	68
Диаметр подводящего канала d_h , мм	0.8	0,93	0,65	0,52
Длина подводящего канала l_h , мм	12,5	12,4	12,2	13,3
Ширина питающего кармана W_p , % от L	58	52,7	55,5	51
Ширина питающего кармана, мм	40.6	18.5	20	14.9
Длина подводящего канала L_p , градусов	18,8	19,7	18,7	11,65
Длина подводящего канала, мм	7.6	7.6	7.6	7.6

Вариант 1 отличается хорошей динамической устойчивостью и управляемостью, вариант 2 имеет средние показатели трения и управляемости, но плохими динамическими характеристиками, вариант 4, напротив, имеет низкое трение, но плохую управляемость. Вариант 3 рассчитан на основе однокритериальной постановки оптимизационной задачи и имеет достаточно усредненные характеристики. Следует отметить, что для всех конфигураций глубина гидростатического кармана составила 1.5 мм.

С целью апробации предложенных в предыдущих работах авторов методик и их уточнения был разработан экспериментальный комплекс, состоящий из двух экспериментальных стендов. В рамках данной работы предложены унифицированные методы оценки характеристик ТТО.

Описание экспериментального комплекса и методик измерения

В рамках данного исследования был спроектирован и собран стенд для оценки динамического поведения роторных систем на ТТО (рисунок 1). Он включает в себя двигатель, датчик крутящего момента, ротор, опирающийся на 2 гидростатодинамические опоры, смазываемые водой.

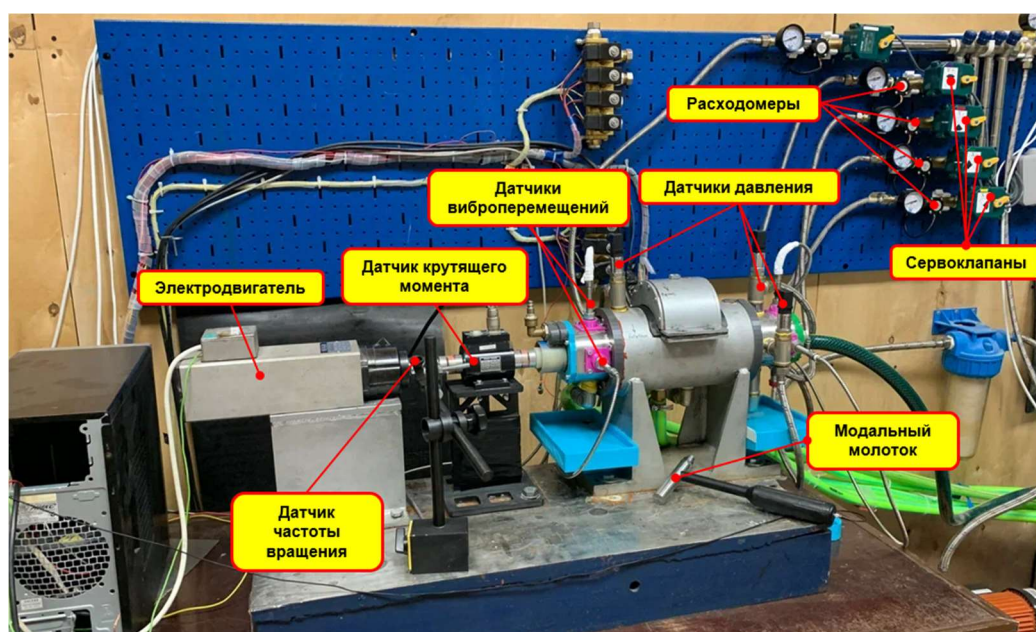


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для исследования динамических характеристик роторных систем на ТТО

Основными задачами, выполненными при помощи данного экспериментального стенда, являлись оценка длительности переходного процесса в ответ на импульсное силовое воздействие на ротор и оценка максимального управляющего воздействия, развиваемого ТТО. Особенностью данного стенда является использование модального молотка Global Test AU4002 с датчиком силы Global Test AC21 для оценки величины импульса силы, прикладываемого к ротору. Максимальное управляющее воздействие оценивалось в гидростатическом режиме (без вращения ротора) косвенно путем определения величины всплытия ротора при приложении в дальнем от муфты подшипниковом узле максимального давления в двух соседних камерах и минимального давления в двух противоположных камерах. Управление давлением осуществлялось при помощи управляемой системы «сервоклапан-датчик давления» с обратной связью, которая осуществляла контроль давления подачи в непосредственной близости от канала подачи смазочного материала.

Второй стенд использовался для исследования момента трения (рисунок 2). Он имеет в своем составе электродвигатель, ротор, опирающийся на одну опору, корпус подшипникового узла, вращающийся в подшипниках качения, тензометрический датчик для измерения момента трения, а также нагрузочные диски.

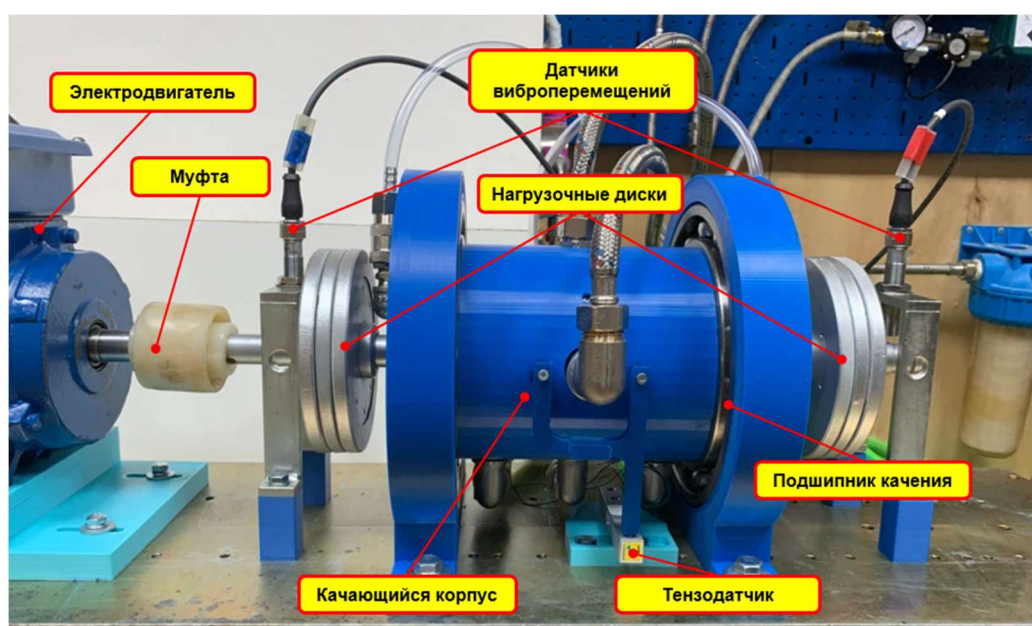


Рисунок 2 – Экспериментальный стенд для исследования момента трения ТТО

Особенностями стенда для исследования момента трения ТТО являются: 1) симметричное нагружение единого триботронного узла (центр масс ротора совпадает с геометрическим центром подшипника); 2) использование качающегося корпуса в подшипниках качения, которое непосредственно позволяет производить измерения момента трения; 3) наличие четырех индивидуальных каналов подачи смазочного материала, позволяющих реализовать индивидуальное управление давлением; 4) использование бесконтактных воздушных уплотнений, уменьшающих общий момент трения трибоузла.

Информационно-измерительная система обоих экспериментальных узлов максимально-унифицирована (рисунок 3).

В составе информационно-измерительной системы используются 2 типа датчиков виброперемещений – вихретоковые и индуктивные датчики. Согласно стандартам измерения вибрации в промышленной технике оба типа сенсоров применимы [17]. В работе [18] приведено обоснование применения вихретоковых сенсоров в качестве основного средства измерения вибрации.

Тензодатчик, используемый в системе измерений, позволяет измерять момент трения, передаваемый на корпус. Расходомер и датчик частоты вращения ротора использовались для системного контроля неосновных характеристик трибоузла.

Результаты

В рамках данного исследования была предложена методика измерения характеристик переходного процесса. Импульсное воздействие на ротор производилось с периодичностью в 1.5-2 секунды, а величина импульса контролировалась при помощи модального молотка. В

процессе математико-статистической обработки импульсы сортировалось по величинам, отличающимся не более 10%. На рисунке 4 приведены примеры переходного процесса для представленных конфигураций ТТО.

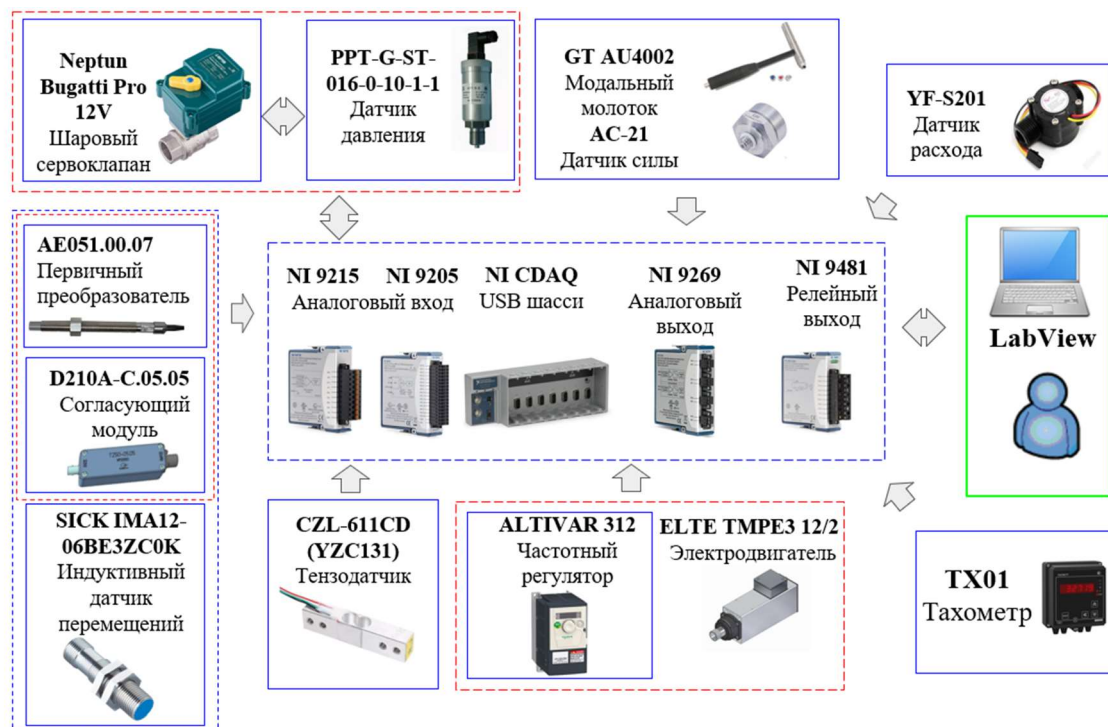


Рисунок 3 – Информационно-измерительная система экспериментальных стенов по исследованию характеристик ТТО

Как видно на рисунке 4, качественно экспериментальные результаты подтверждают произведенные расчеты. Конфигурации 3 и 4 имеют схожий вид переходного процесса, а время переходного процесса равно 25 и 28 мс соответственно. Вид переходного процесса конфигурации 1 сильно отличается от всех остальных. Длительность переходного процесса рана 15 мс. Для «неустойчивой» конфигурации №2 время переходного процесса составило 55 мс.

Измерение момента трения производилось путем осреднения действительного значения момента трения за короткий промежуток времени 1с. Давление подачи смазочного материала во всех камерах было одинаковое и составляло 2 атм. На рисунке 5 представлены результаты измерений момента трения в смазочном слое опор. Можно отметить как качественное, так и, в целом, количественное соответствие экспериментальных результатов расчетным данным. Вместе с тем, в экспериментальных результатах наблюдается также систематическая погрешность измерения, связанная, вероятно, с потерями энергии на трение в опорах качающегося корпуса и при изгибах подводящей арматуры. Принимая характер такой погрешности аддитивным и учитывая его при анализе результатов, можно констатировать, что расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 7%, что позволяет считать проведенные расчеты и соответствующие методики корректными.

Исследование максимального управляющего воздействия, которое может реализовать управляемая опора, производилось косвенным путем. Его величина оценивала по максимальному подъему цапфы вала, когда система управления опоры создает максимальное управляющее воздействие в вертикальном направлении. Для этого в нижнюю камеру подается максимальное давление смазочного материала, а в верхнюю – минимальное. На рисунке 6 представлены результаты измерения положения центра цапфы для протестированных конфигураций, а также соответствующие численные результаты.

Заметно, что конфигурации 2 и 3 должны обеспечивать схожие результаты, однако экспериментальные результаты показывают, что данные конфигурации №2 и 3 наряду с конфигурацией №1 расположились равномерно, что может быть связано с экспоненциально возрастающей реакцией смазочного слоя при высоких эксцентриситетах.

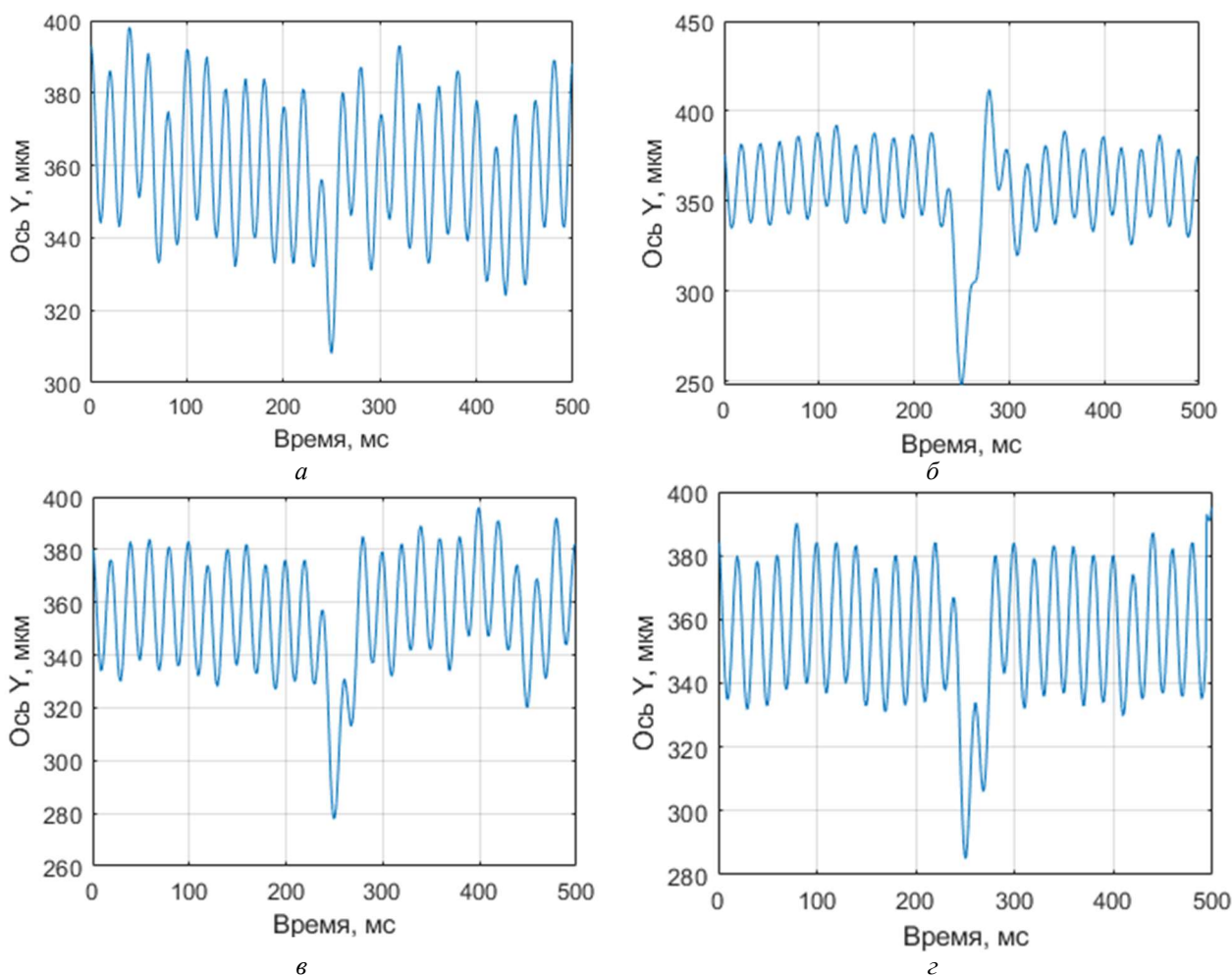


Рисунок 4 – Результаты исследования переходных процессов роторных систем на ТТО:
а – конфигурация №1, б – конфигурация №2, в – конфигурация №3, г – конфигурация №4

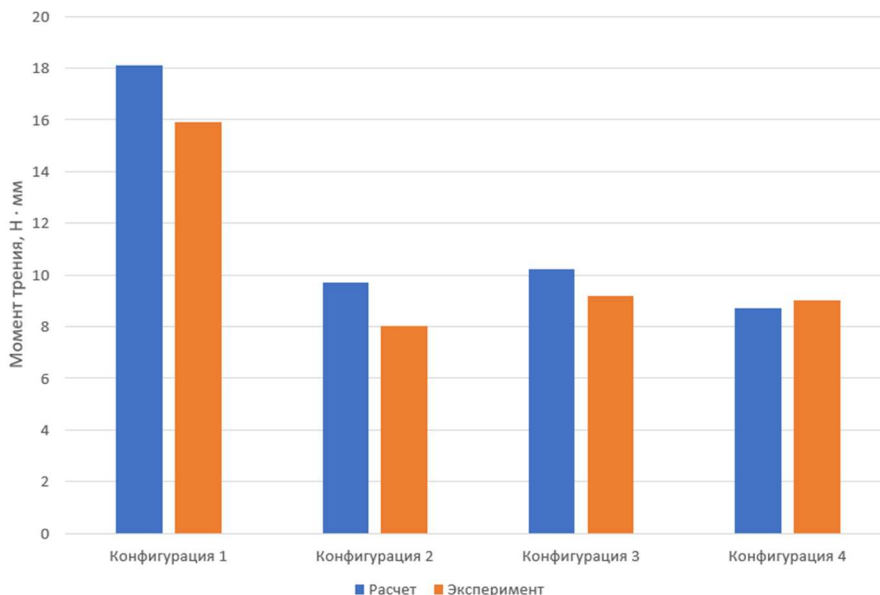


Рисунок 5 – Результаты измерения момента трения ТТО

Проведенный комплекс экспериментальных исследований спроектированных активно смазываемых гибридных опор позволил дать оценку фактическим значениям тем параметрам, которые задавались в процессе их проектирования в качестве целевых функций. Для всех проведенных расчетов качественные соотношения между рассмотренными параметрами спроектированных образцов соответствуют расчетным значениям. Количественные значения в пригодном для прямого сравнения виде оказалось возможным получить для ограниченного

количества параметров. Так, отклик на динамическое воздействие не может быть полностью воспроизведен в том же виде, что и в численной модели, ввиду наличия у реального ротора ненулевого дисбаланса, что приводит к искажениям в результатах измерений ввиду наличия вынужденных колебаний. Вместе с тем, опосредованный количественный анализ для таких величин показывает соответствие расчетным данным как порядка полученных значений, так и их соотношений между собой.

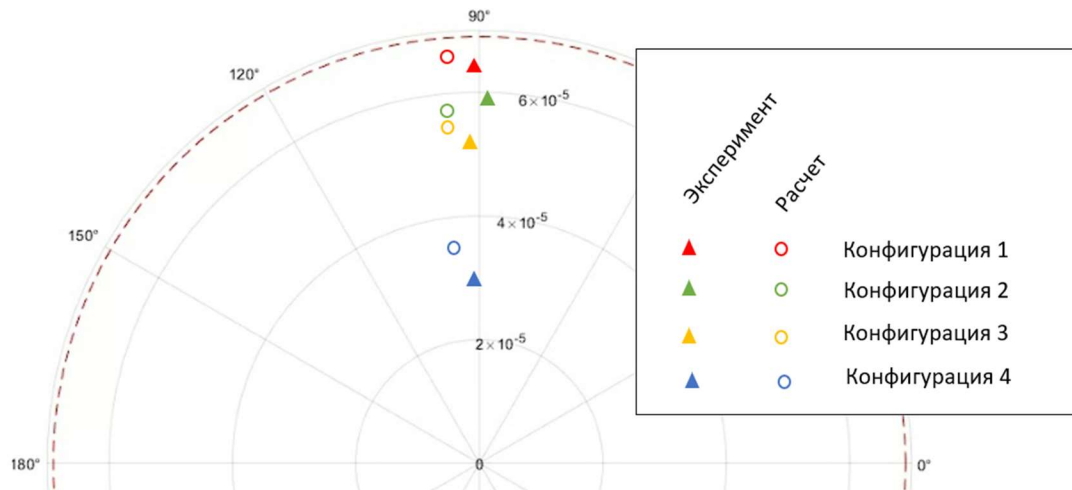


Рисунок 6 – Результаты измерения максимального управляющего воздействия

Таким образом, можно сделать выводы, что предложенная методика проектирования триботронных опор роторов позволяет обеспечивать заданные свойства энергетической эффективности, динамической стабильности и управляемости в системах ротор-ТТО.

Выводы

В ходе исследования был спроектирован экспериментальный комплекс для исследования интегральных и динамических характеристик роторных систем с триботронными опорами жидкостного трения. Методика оптимального параметрического синтеза была апробирована посредством решения задачи проектирования активно смазываемых гибридных опор с различающимися свойствами для их экспериментального исследования в составе созданного комплекса. Результаты показали как качественное, так и удовлетворительное количество фактических параметров опор расчетным данным.

Совместный анализ результатов решения задачи параметрического синтеза и экспериментальных данных позволило сделать вывод о принципиальной применимости предложенного подхода и методического комплекса к решению практических инженерных задач. При этом могут создаваться управляемые подшипники с различными свойствами, заложенными в виде целевых функций оптимизационной задачи. Полученные результаты станут основой для совершенствования предложенной методики и дальнейшего расширения ее методической, алгоритмической и инструментальной базы.

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 per-formance 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 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.

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 УНИВЕРСИТЕТ имени И.С. ТУРГЕНЕВА" (ОГУ им. И.С. Тургенева). – EDN ХАНОТМ.

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 технологий. – 2023. - №4 (360). – С. 230-240.

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.

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 С.

15. Mechanical vibration — Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. - ISO 14839-1:2018. – 22 P.

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) – 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.

Фетисов Александр Сергеевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Ассистент кафедры мехатроники, механики и
робототехники

Литовченко Максим Геннадьевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл
Студент кафедры мехатроники, механики и
робототехники

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 *Engineering 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.С. Фетисов, А.Ю. Родичев, М.Г. Литовченко, Д.В. Шутин, 2024

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.

Введение

В настоящее время роторные системы находят широкое применение во многих отраслях энергетики и машиностроения, в том числе в ракетной и авиационной технике, нефтяной и газовой промышленности, судо- и автомобилестроении, станкостроении, приборостроении. Особым классом машин с опорами жидкостного трения являются турбоагрегаты (насосы, детандеры, компрессоры). Одним из дополнительных требований, предъявляемым к опорам роторов транспортного машиностроения и авиационной техники, является обеспечение надежной работы при различном пространственном положении ротора. Ротор стационарной турбомшины может иметь как горизонтальное, так и вертикальное расположение, при этом интенсивность и направление действия нагрузки на опоры различны. При вертикальном расположении ротора дополнительной составляющей осевой нагрузки является сила тяжести ротора, которая не зависит от вращения. Вертикальные насосные (рисунки 1) и компрессорные агрегаты, конструктивной особенностью которых является соответствующее их названию расположение вала и рабочего колеса, нашли широкое распространение как в быту, так и в различных отраслях промышленности. Благодаря вертикальной компоновке вала, рабочего колеса и корпуса для установки этого оборудования не требуется много места, что и является одной из основных причин его широкого распространения.

Одним из важнейших узлов осевой роторной машины (осевого компрессора, турбодетандера, центробежного насоса) является осевой подшипник. Даже незначительное повреждение или небольшое отклонение от нормальной работы приводит к необходимости остановки всего турбоагрегата. Поэтому осевой подшипник должен обладать такой несущей способностью, которая обеспечивала бы безаварийную работу при любых возможных режимах эксплуатации турбоагрегата [1, 2]. Повышение полезной мощности может быть достигнуто двумя путями: 1) увеличение габаритов агрегата; 2) увеличение частоты вращения ротора. Первый путь приемлем, если используется стационарный турбоагрегат (турбогенератор). В условиях жестких требований к массогабаритным характеристикам в турбоагрегатах ракетно-космической и авиационной техники единственным путем увеличения полезной мощности остается второй путь.

При переходных режимах (пуск и останов), а также при изменении режима работы турбомшины (изменение давления в камере сгорания и соотношения компонентов) неизбежны различные изменения осевых сил в насосе и турбине. Суммарная осевая сила, действующая на ротор, может достигать значительных величин и существенно меняться по времени. Несогласованность изменения различных составляющих осевой силы при

переходных процессах, несмотря на меньший численный уровень каждой составляющей, чем при номинальных режимах работы, может привести к появлению суммарной осевой силы, кратковременно значительно превосходящей осевую силу на установившемся режиме [3].

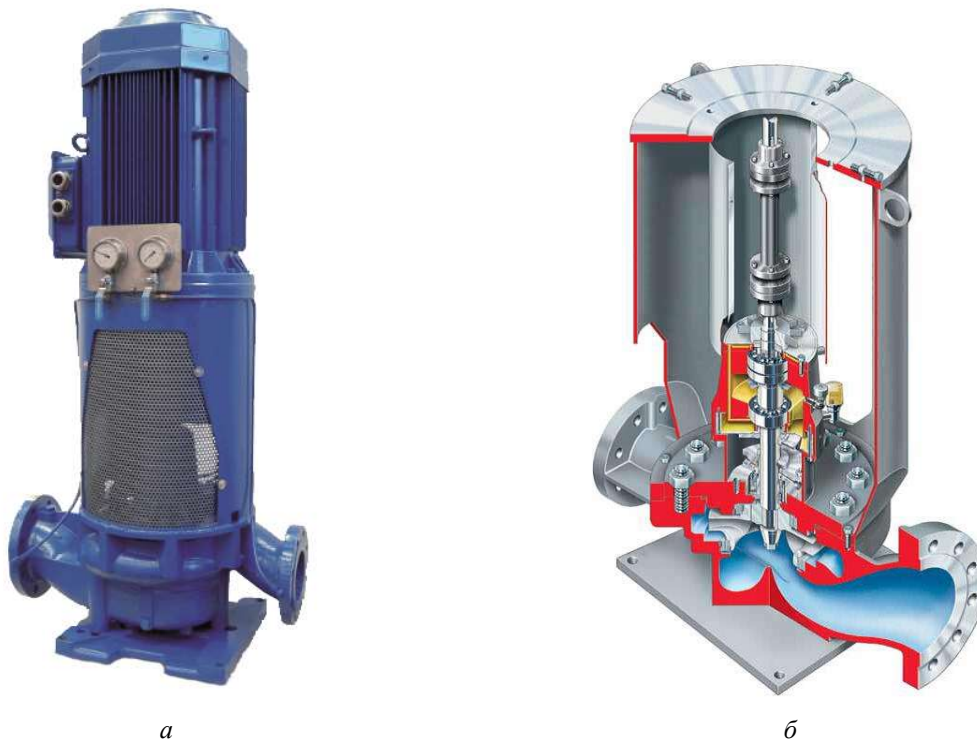


Рисунок 1 - Конструкция вертикального насосного агрегата: а – общий вид; б – разрез

Основная часть

Динамическое состояние турбогенератора, характеризуемое спектром собственных частот, уровнем вибрации статора, амплитудой колебаний ротора, а также усилиями и динамическими напряжениями, действующими на элементы машины, определяются жесткостью и демпфированием в опорах. В качестве опор ротора турбогенераторов наиболее перспективными являются упругоподатливые опоры, однако их опорные поверхности при переходе критических частот вращения подвергаются к износу в следствии превышения допустимых амплитуд движения [7]. Наиболее перспективным способом решения данной проблемы является применение бесконтактных устройств воздействия на ротор или опору, в виде дополнительного магнитного подшипника, или отдельных его элементов. Это позволяет, не влияя на процессы в смазочном слое, без увеличения трения воздействовать на амплитудно-частотные характеристики роторно-опорных узлов и работоспособность всего рабочего органа. При этом применение ферромагнитных жидкостей в качестве смазочного материала позволяет получить уникальные свойства опорного узла, объединяя воедино три составляющих: упруго-демпферный лепестковый подшипник, электромагнитный подвес ротора и ферромагнитный смазочный материал.

Конструкция лепесткового электромагнитного подшипника с ферромагнитной жидкостью представлена на рисунке 2. Представленная опора состоит из корпуса осевого лепесткового подшипника 1, в котором установлены электромагниты 2, металлические лепестки 3, образующие внахлест упругоподатливую опорную поверхность фиксируются винтами 4. Полость между валом 5 и упорной поверхностью заполнена ферромагнитной жидкостью, представляющей собой искусственную жидкую среду, обладающую свойствами, обычно исключаящими одно другое – намагниченностью и текучестью. Находясь в магнитном поле, ферромагнитная жидкость приобретает магнитный момент, который лишь на порядок меньше магнитного момента твердых магнетиков.

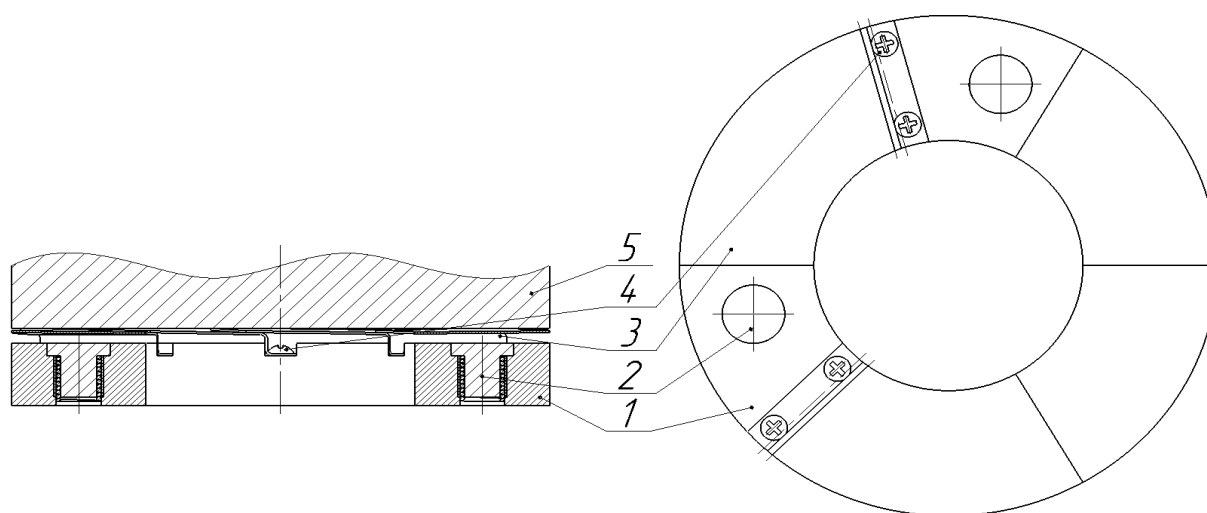


Рисунок 2 – Конструкция лепесткового электромагнитного подшипника с ферромагнитной жидкостью

Подшипники скольжения с ферромагнитным смазочным материалом находят широкое применение в прецизионной технике, они сочетают в себе преимущества гидродинамических подшипников (большая жесткость, демпфирование колебаний на высоких скоростях, низкий уровень шума) и способность к самоуплотнению [8]. В данном подшипнике физические свойства ферромагнитного смазочного материала определяются свойствами основы, содержанием дисперсной фазы, агрегатной устойчивостью дисперсных частиц, напряженностью внешнего магнитного поля. Размер магнитных частиц должен быть достаточно мал, поскольку этим определяется устойчивость магнитной жидкости к разложению на фазы. В качестве материала твердой фазы используется магнитный железняк (FeO, Fe_2O_3), так как этот материал является легкодоступным. Также предъявляются особые требования к стабилизатору, предотвращающему слипание частиц и образование кластерных структур в магнитном поле. Длинноцепная часть молекул стабилизатора должна быть сходна с жидкостью-основой, чтобы участвовать в тепловом движении и этим предотвращать сближение молекул. В качестве стабилизатора используются вещества: (полимеры, поверхностно-активные вещества - ПАВ), содержащие функциональные группы (OOH, H_2OH, H_2NH_2 и др.) [9-10].

Коллоидную систему с взвешенными частицами будем рассматривать как однородную систему, учитывая явления, характеризующиеся расстояниями большими, чем размер самой частицы. Сила взаимодействия магнитного поля с магнитным зарядом частицы, находящейся в жидкости, является объемной силой, для которой справедливо соотношение:

$$\vec{F} = \mu_0(\vec{\nabla}\vec{M})\vec{H}, \quad (1)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума,

\vec{M} - вектор намагниченности.

В данном соотношении вектор намагниченности \vec{M} связан с вектором напряженности магнитного поля \vec{H} :

$$\vec{M} = (M/H)\vec{H} = \chi_s\vec{H}, \quad (2)$$

где χ_s - магнитная восприимчивость материала магнитных частиц.

Данные величины определяются соотношениями Максвелла, описывающих электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами в сплошных средах:

$$\text{div}\vec{B} = 0, \vec{B} = \mu_0(1 + \chi_s)\vec{H}, \text{rot}\vec{H} = 0. \quad (3)$$

Выражение (1) с учетом соотношения (2) можно представить, как:

$$\vec{F} = \mu_0(\vec{\nabla}\chi_s\vec{H})\vec{H}. \quad (4)$$

Величина данной силы по толщине смазочного слоя (по оси y):

$$\vec{F}_y = \frac{\mu_0\chi_s\partial H}{\partial y}. \quad (5)$$

Таким образом, учитывая упрощенную модель взаимодействия электромагнита с жидкостью, создается давление на лепесток равным произведению площади обратной стороны лепестка на силу, создаваемую ферромагнитной жидкостью по длине подшипника. Для описания таких сред воспользуемся выражениями феррогидродинамики – гидродинамика жидких намагничивающихся сред в присутствии магнитного поля. Сила, действующая на намагничивающиеся среды в магнитном поле, связана с неоднородностью магнитного поля и неоднородностью или разрывами магнитных характеристик среды. Как правило, феррогидродинамика рассматривает неполяризуемые (в электрическом поле), непроводящие и незаряженные среды, так что силы, связанные с электрической поляризацией, сила Лоренца и кулоновская сила отсутствуют [11-13].

Расчет характеристик подшипников скольжения предполагает определение полей давления в смазочном слое, основное уравнение для определения поля давлений – модифицированное уравнение Рейнольдса, обобщенное на случай турбулентного течения вязкого сжимаемого смазочного материала, которое с учетом приведенных допущений имеет следующий вид [14]:

$$\frac{\partial}{r\partial r} \left[\frac{\rho r h^3}{\mu K_r} \frac{\partial p}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{r\partial \phi} \left[\frac{\rho h^3}{\mu K_\phi} \frac{\partial p}{r\partial \phi} \right] = 6 \frac{\partial}{r\partial r} (\rho r h V_r) + 6 \frac{\partial}{r\partial \phi} (\rho h V_\phi) + 12 \rho V_y \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\mu} \mu_0 M \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (6)$$

где $p = p(\theta, z)$ – давление газа,
 μ – вязкость,
 ω – угловая скорость,
 R – внутренний радиус подшипника, образованный комплектом упругих элементов,
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума,
 M – намагниченность
 H – напряженность магнитного поля.

При моделировании течения смазочного материала необходимо учитывать с одной стороны малую толщину смазочного слоя, а с другой - сложную геометрию поверхности осевого зазора, которая является следствием упругих свойств лепестка. Значительное влияние на распределение давления в смазочном слое оказывает толщина осевого зазора $h(r, \phi)$, входящая в основные гидродинамические уравнения. В общем виде осевой зазор определяется следующим образом [15-16]:

$$h(r, \phi) = h_0 + h_k + w; \quad (7)$$

где h_0 – начальный зазор,
 h_k – зазор, образованный наклонной плоскостью лепестка,
 w – величина прогиба лепестка под действием давления в смазочном слое

В силу того, что габаритные размеры лепестка много больше его толщины, то лепестки можно отнести к классу тонких пластин. Вследствие этого, каждый лепесток УЛГП можно представить секторной пластиной, прогиб которой удовлетворяет дифференциальному уравнению Жермен-Лагранжа. В цилиндрических координатах уравнение примет вид:

$$\left(\frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) = \frac{p + \frac{F_{em}}{A}}{D} \quad (8)$$

где p – гидродинамическое давление;
 F_{em} – электромагнитная сила;
 A – площадь поверхности лепестка.

Входящая в выражение (8) электромагнитная сила зависит от геометрических параметров многополюсного электромагнита (рисунок 3).

Электромагнитная сила, действующая на лепесток [17], определяется, как:

$$F_{вт} = \frac{U k_{Cu} \alpha^2 l_m}{H 128 \rho \mu_0^2} \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t \right)^2 \left(\frac{\pi d}{8} - t \right)^2, \quad (9)$$

где U - напряжение, подаваемое на обмотки катушек;
 H - зазор между обмотками электромагнита и лепестком;
 k_{Cu} - коэффициент заполнения площади паза A медью (ориентировочно $k_{Cu}=0,3...0,5$);
 α - коэффициент числа полюсов, $\alpha=0,924$ при количестве полюсов $p = 8$;
 l_m - средняя длина проводника катушки; $\rho \approx 0.018 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ - удельное сопротивление меди - материала, из которого выполнены провода обмотки; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная постоянная;
 D - внешний диаметр обмоток катушек;
 d - внутренний диаметр обмоток катушек;
 t - ширина полюса.

Пользуясь выражением (9), можно определить силу, действующую на лепесток МГДП со стороны электромагнита, что позволяет рассчитать его дополнительную деформацию, обусловленную воздействием электромагнитных сил, которые в свою очередь можно регулировать за счет изменения напряжения постоянного тока, подаваемого на обмотки электромагнита, и тем самым управлять перемещением лепестка.

При отсутствии электрического тока лепестки плотно охватывают вал, фиксируя его в пространстве, воспринимая статическую нагрузку (фаза 1, рисунок 3). При старте без работающих электромагнитов подшипник работает в условиях фрикционного контакта между поверхностями упругих элементов и вала, а по достижении определенной частоты вращения всплывает, заполняя зазор ферромагнитной жидкостью, которая при выключенных магнитах выполняет роль смазки с минимальной вязкостью.

Если в момент пуска включаются электромагниты (фаза 2, рисунок 3), лепестки притягиваются к корпусу и изгибаются в радиальном направлении, а ферромагнитная жидкость становится более вязкой, что увеличивает несущую способность подшипника во время минимальной скорости вращения, при достижении номинальной частоты – магнит выключается и подшипник работает в режиме гидродинамического трения. В момент остановки включается электромагнит и более вязкая жидкость тормозит вращение, при создании необходимой несущей способности, исключая контакт вала и тонкостенных упругих элементов [18-20].

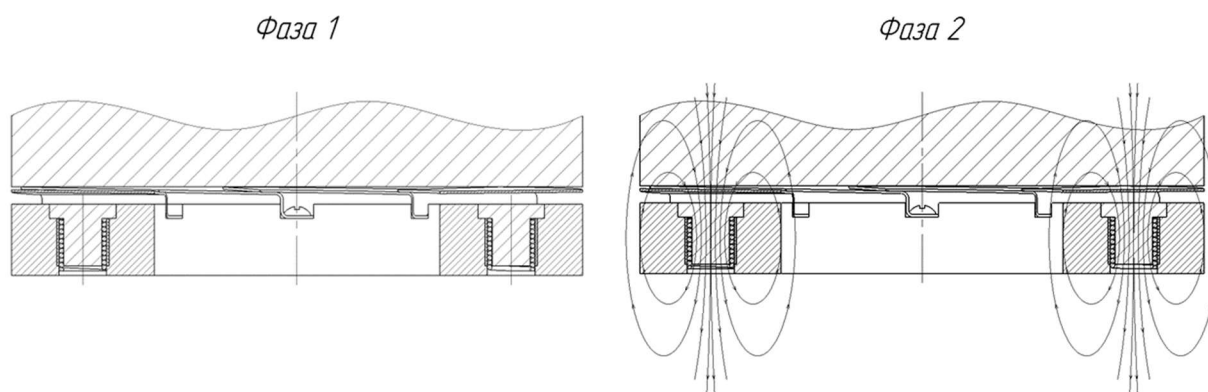


Рисунок 3 – Режимы работы опоры

Использование ферромагнитной жидкости в качестве смазки практически не оказывает влияния на разгон ротора. В процессе работы ротор может замедляться и разгоняться, преодолевая при этом критические частоты вращения. Предложенное решение позволяет ротору преодолевать критическую частоту вращения не достигая ее. Рассмотрим процесс перехода критической частоты.

В процессе работы ротора его колебания фиксируются датчиками системы управления. При превышении установленного порога амплитуды колебаний на электромагнит мгновенно подается напряжение. В результате этого амплитуда колебаний ротора смещается из точки 1 (см. график на рисунке 4) в точку 2 и амплитуда колебаний ротора падает и продолжается

процесс разгона ротора. В тот момент, когда амплитуда колебаний ротора повторно достигает порогового значения, система управления отключает электромагниты. Таким образом, сила, создаваемая электромагнитом, изменит вязкость смазочного слоя и ротор пройдет критическую частоту вращения с минимальным износом [21].

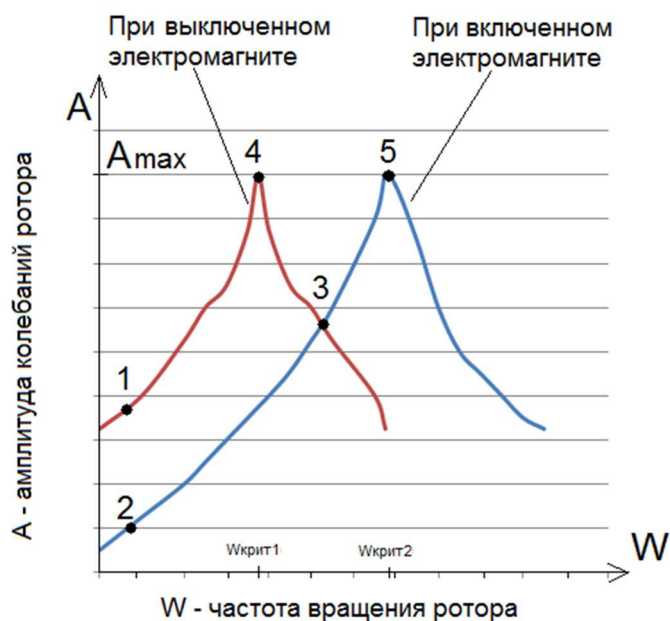


Рисунок 4 - Амплитудно-частотная характеристика ротора

Таким образом, принцип работы ферромагнитного демпферного устройства заключается в следующем:

1. При приближении к критической частоте вращения ротора, система управления фиксирует изменения в амплитуде его колебаний посредством обработки значений с датчика виброперемещений.

2. В момент увеличения амплитуды колебаний до порогового значения, система управления подает команду на включение электромагнита.

3. В момент подачи напряжения на электромагнит вязкость смазочного слоя меняется, в следствии чего меняется и критическая частота вращения ротора.

4. При повторном увеличении амплитуды колебаний вала до порогового значения с включенными электромагнитами система управления снимает напряжение с электромагнитов.

5. Вязкость жидкости становится прежней, а критическая частота вращения ротора остается позади.

Выводы

Применение данной конструкции и специальной ферромагнитной жидкости позволяет обеспечить стабильную работу и амплитудно-частотные характеристики, а также минимальный износ ротора во всем диапазоне скоростей. Возможность бесконтактного влияния на адаптивную упругоподатливую опорную поверхность и ферромагнитный смазочный материал позволяет достичь оптимальных по расходу энергии траекторий движения ротора, в условиях управляемого реологического поведения магнитной жидкости. Описанная в данной работе конструкция опорного узла является представителем перспективного направления развития управляемых упруго-демпферных опор роторов. При этом, лепестковый электромагнитный подшипник с ферромагнитной жидкостью не теряет работоспособности при отключении источника питания, что позволяет избежать аварийных ситуаций. Определение необходимых параметров плотности и вязкости ферромагнитной жидкости, зависящих от подаваемого на обмотки электромагнитов напряжения, предполагает гибкую настройку и внедрение данного вида опор в мехатронный автономный комплекс с

устойчивыми характеристиками в различных климатических условиях, а также при изменяемых рабочих параметрах без выключения оборудования.

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. 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. 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

Серебrennikov 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
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

Sukhoruchko Alexey Valerievich

OOO NTC "APM"
Head of Strength Calculations Department
302020, Orel, Naugorskoe highway, 5
E-mail: sukhорuchko@apm.ru

Vnukov Sergei Sergeevich

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

Serenko Ilya Alexandrovich

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

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.

Введение

Развитие современных роторных машинах с электрическим и турбинным приводом (двигатели транспортных средств, энергетические агрегаты, насосы, компрессоры, детандеры, механические передачи вращения) связано с увеличением требований к скоростям вращения валов, уровням давления рабочих сред, температурными режимами и уменьшения зазоров между вращающимися и неподвижными частями машины. При этом повышаются требования к параметрам надежности и экономичности [1, 2]. Улучшение экономичности возможно не только за счет повышения параметров цикла, а также при совершенствованиях элементов конструкции [3-5].

Традиционные методики проектирования уплотнительных узлов приводят к созданию жестких конструкций с фиксированным зазором (щелевые, лабиринтные уплотнения), что приводит к тому, что под действием силовых, кинематических и тепловых возмущений на рабочем режиме уплотнение работает с избыточным зазором, что ведёт к ухудшению экономичности и снижению КПД газотурбинного двигателя [6, 7].

Для поддержания рабочего зазора и обеспечения герметичности требуется учитывать геометрические характеристики и точность обработки поверхности вала и уплотнения. Также необходимо иметь возможность прогнозировать температурные изменения вала и самих элементов бесконтактного пальчикового уплотнения (пальчиков). При выполнении с высокой точностью всех требований последние изменяются со временем в зависимости от эксплуатационных возможностей износа элементов конструкции. Это приводит к значительным потерям производительности и увеличению уровня утечки в уплотнении.

Для контроля рабочего зазора между уплотнением и поверхностью ротора, а также и его регулировании формулируется задача, связанная с проектированием уплотнительного узла (модуля) для исследования расходно-напорных характеристик.

Основная часть

Первоначальная компоновка экспериментального уплотнительного узла (модуля) рассмотрена в работе [1, 8]. Исходя из экспериментальных условий, различных эксплуатационных и геометрических параметров данный узел был подвержен рационализаторской переработке.

Компоновочная схема уплотнительного узла (модуля) экспериментальной установки для расходно-напорных характеристик бесконтактного пальчикового уплотнения представлена на рисунке 1.

Уплотнительный узел (модуль) экспериментальной установки для исследования влияния расходно-напорных характеристик бесконтактного пальчикового уплотнения состоит из – корпуса 1 с размещением в нем бесконтактного пальчикового уплотнения 2

подразделяющегося на кольца высокого и низкого давления, фиксируемого в осевом направлении при помощи крышки 3. В крышке предусмотрено резьбовое отверстие для вкручивания фитинга 4, осуществляющего подачу сжатого воздуха под давлением в узел установки. Вал 5 конструктивно изменен, выполнен переход с наименьшего на наибольший диаметр при помощи конусности. При этом уменьшается концентрация напряжений в переходе между ступенями и уменьшается турбулентная зона при протекании воздуха. Дополнительно в корпусе 1 расположено манжетное уплотнение 6, предотвращающее смешивание уплотняемых сред между подшипниковым узлом 7 и уплотнительным модулем. По периметру корпуса над подвижными площадками уплотнения сделаны резьбовые отверстия для размещения датчиков температуры 8.

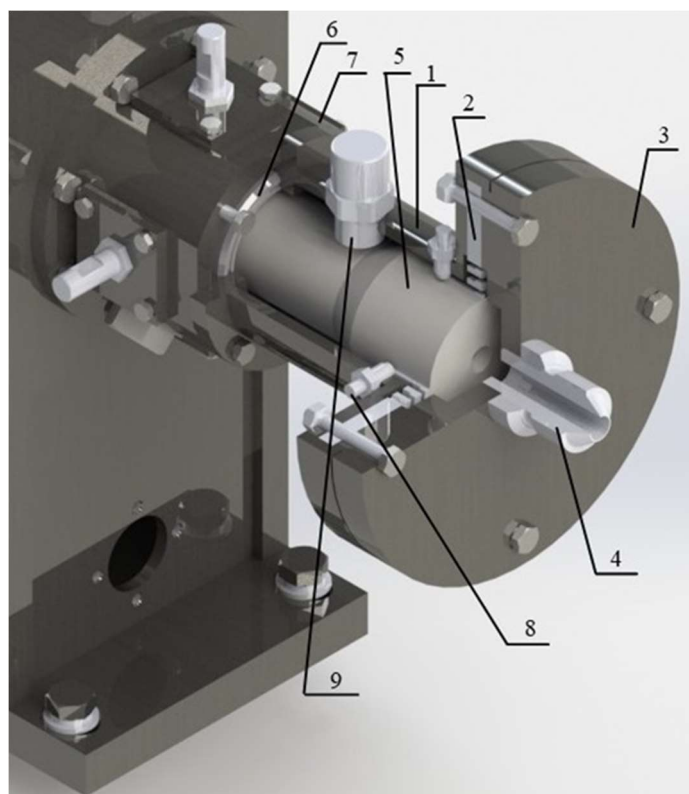


Рисунок 1 – Компонентная схема уплотнительного узла (модуля):

1 – корпус; 2 – бесконтактное пальчиковое уплотнение; 3 – крышка; 4 – фитинг; 5 – вал; 6 – манжетное уплотнение; 7 – корпус подшипникового узла; 8 – датчик температуры; 9 – датчик давления

Указанные резьбовые отверстия служат для размещения поджимных винтов (не показаны) для регулирования зазора между ротором и подъемными площадками бесконтактного пальчикового уплотнения. Прижатие происходит при помощи вкручивания винтов и воздействие их на данные площадки, тем самым уменьшая или увеличивая величину зазора между поверхностью вала и подъемными площадками. Так же сделаны резьбовые отверстия для размещения клапанов сброса избыточного давления (не показан) и датчика давления 9 контролирующей выходную величину давления после уплотнения. На входе в уплотнительный узел расположен датчик давления (не показан) для отслеживания входной величины заданного давления. Данная конструкция представляет собой разборный узел.

Для получения и обработки данных так же была переработана информационно-измерительная система представленная на рисунке 2.

Информационно-измерительная система (таблица 1) собрана на основе программируемого контроллера с макетной платой. При помощи, данной информационно-измерительной системы можно получать с датчиков данные о частоте оборотов вала, давлении и температуре, а также обрабатывать их. Дополнением к ней была написана программа мониторинга состояния системы, отображающая графическую информацию.

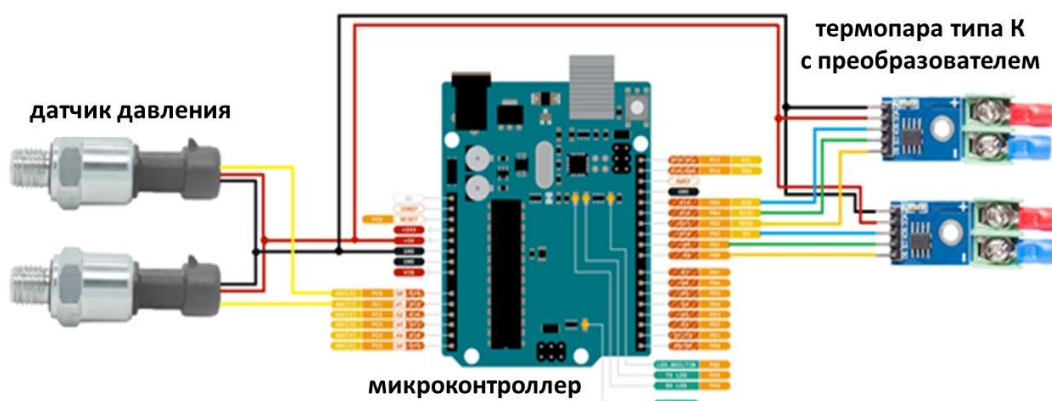


Рисунок 2 – Принципиальная схема информационно-измерительной системы

Элементарная база информационно-измерительной системы [9, 10, 11] представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Элементарная база информационно-измерительной системы

№	Наименование, модель	Характеристика
1	Датчик давления XDB 301	Диапазон измерения: 0-0.8 МПа Точность: $\pm 1.0\%$ FS Выходной сигнал: 0,5-4,5 Напряжение питания: 5VDC Рабочая температура: $-40 \sim 105$ °C Рабочий ток: ≤ 3 мА Время отклика: ≤ 3 мс Материал корпуса: нержавеющая сталь 304 Класс защиты: IP65
2	Датчик линейного перемещения LJ12A3-4-Z/BX	Вид: индуктивный Тип: NPN, NO Напряжение: 12...24 В Дистанция: 4 мм Частота срабатывания: до 500 Гц Материал реагирования: сталь, алюминий, медь, бронза, латунь, свинец Ток транзистора: 300мА
3	Термопара К - типа	Обозначение: ТХА Материал проводников: хромель алюмель (NiCr-Ni) Диапазон измерения температуры: от 0 до + 600 °C Точность измерения температуры: ± 2 °C Чувствительность термопары: 40 мкВ/°C
4	Модуль преобразователя сигнала МАХ6675	Шаг измерения: 0,25°C Точность: 1,5°C Интерфейс подключения к контроллеру: SPI Напряжение питания: 3 – 5,5 В постоянного тока Тип термопары: К (хромель-алюмелевая); Диапазон измеряемой температуры: 0 – +600°C

На первом в информационно–измерительную систему были заложены механические манометры для измерения давления на входе и выходе уплотнительного узла [12, 13]. Данные манометры диафрагменного типа со шкалой деления 0,2 Бар. В процессе проведения эксперимента механические манометры не смогли показать величину давления. При

воздействию давления на чувствительный элемент – мембрану, настолько мало, что не смогло заставить индикаторную стрелку перемещаться.

Из-за невозможности измерить малые значения давления на входе и выходе уплотнительного узла был произведен поиск и в последующем анализ датчиков давления с требуемыми параметрами для решения данной задачи. После анализа датчиков был подобран датчик типа XDB301 [6]. Измеряющий в диапазоне от 0 до 8 Бар с точностью до 1% от предела диапазона значений (Full Scale – FS), т.е. $\pm (8/100) = \pm 0.08$ Бар. Датчик имеет 3 провода: 1 на питание от 5 до 12 В (красный), один чёрный, на заземление, один жёлтый – управляющий. Жёлтый провод выдаёт значение в диапазоне от 0.5 до 4.5 В, т.е. датчик является аналоговым [13].

Значения показаний датчика давления в ходе экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения показаний датчика давления

Диапазон давления: 0-8 Бар, питание: 5-12 VDC, выходное: 0,5-4,5V, точность: $\pm 1\%FS$		
Точки измерения давления (Bar)	Точки измерения давления (Pa) – Pd	Выходное питание (V) $\pm 0.04V$
0	0	0.50
0.5	50000	0.75
1.0	100000	1.00
1.5	150000	1.25
2.0	200000	1.50
2.5	250000	1.75
3.0	300000	2.00
3.5	350000	2.25
4.0	400000	2.50
4.5	450000	2.75
5.0	500000	3.00
5.5	550000	3.25
6.0	600000	3.50
6.5	650000	3.75
7.0	700000	4.00
7.5	750000	4.25
8.0	800000	4.50
$V=0.5*Pd+0.5$, Pd – давление в Pa		

Для дальнейшей работы с микроконтроллером и датчиками нужно знать суммарную погрешность информационно-измерительного контура. Погрешность будет складываться из погрешности датчика давления, погрешностью микроконтроллера, погрешности возникающей из-за длины проводов и внешних помех. Расчет погрешности измерения для датчика давления и микроконтроллера будем рассматривать только инструментальную погрешность, пренебрегая погрешностями относящиеся к различным методам измерения. Довольно точный расчет погрешности информационно-измерительного канала приводит к определению функции распределения погрешностей являющейся сложной задачей. Задачей данного расчета состоит в определении величин давления в уплотнительный узел.

В связи с тем, что аналоговые датчики генерируют выходной сигнал в виде непрерывного изменяющегося значения напряжения или тока. Для снятия значений выходного сигнала используется аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) микроконтроллера, в дальнейшем производя преобразования значения АЦП в формат измеряемой величины в нашем случае это напряжение. Для датчика давления величина напряжения 0.5-4.5В, где 0.5 В соответствует давлению в 0 Бар, 4.5 В максимальному

давлению датчика 8 Бар. При этом, выходным значением АЦП микроконтроллера будет некоторое преобразование числа в выходном регистре. Где далее данное числовое значение необходимо перевести в абсолютное значение в единицах измеряемой величины. В нашем случае микроконтроллер интерпретирует выходное напряжение с датчика в значения от 0 до 4095 (всего значений 4096) относительно опорного напряжения микроконтроллера. Датчик имеет линейное распределение выдаваемых значений представленных в таблице 1. Для перевода значения напряжения в давление воспользуемся методом пропорций, выведя по формуле, представленной в таблице 2 значение давления из напряжения. Для начала необходимо перевести числовые значения от 0 до 1023, которые выдает микроконтроллер в вольты:

$$X = \frac{4095}{5B} = 819 \frac{1}{B}, \quad (1)$$

Значение, полученное из формулы 1, – является множителем. Именно это значение обозначает 1 Вольт. Для удобства вычислений нам необходимо поделить это значение пополам, и мы получим 0.5 Вольта:

$$\frac{819}{2} = 409,5 \frac{1}{B}, \quad (2)$$

Теперь, когда мы получили данный множитель, подставляем это в формулу, указанную на рисунке 1 вместо значений напряжения. Получим следующую формулу:

$$Y = 102.4 * Pd + 102.4, \quad (3)$$

Выводим из формулы 3 значение Бар

$$Pd = \frac{Y - 102.4}{102.4}, \quad (4)$$

Формула 4 является конечной, её и необходимо использовать расчетной программе.

Следующий тип датчиков, которые использовались, это термопара К-типа совместно с нормализатором сигнала МАХ6675 [8]. Термопара выдаёт аналоговый сигнал, который необходимо преобразовывать также, как в случае с датчиком давления. Если в случае с датчиком давления все операции производились АЦП микроконтроллера, то в случае с термопарой это делает модуль МАХ6675, который имеет внутри отдельный АЦП. При этом плюсом данного модуля является и то, что он учитывает температуру окружающей среды и показывает только температуру горячего спая термопары. Разрядность этого преобразователя составляет также 12 бит. МАХ6675 может быть подключен к микроконтроллеру посредством интерфейса SPI, а также по отдельности. Выдаваемый модулем сигнал является цифровым. Библиотека в случае с этими модулями использовалась уже готовая и проблем никаких не возникло. Принцип использования библиотеки заключается в создании нескольких объектов класса МАХ6675, к которым в дальнейшем можно будет обратиться по отдельности. Программный код для микроконтроллера представлен на рисунке 3.

Микроконтроллер имеет также особенность при переводе аналогового сигнала в цифровой. Если вспомнить, что при переводе мы имеем всего 12 разрядов, которые обозначают напряжение от 0 до 5 вольт, то можно вычислить разрешающую способность, т.е. минимальный шаг, на который может измениться выводимое нам значение. Вычисляется эта способность по следующей формуле:

$$\Delta_{АЦП} = \frac{U_{on}}{2^n - 1}, \quad (5)$$

где $\Delta_{АЦП}$ – разрешающая способность АЦП,

U_{on} – опорное напряжение АЦП,

n – количество разрядов для передачи информации данного АЦП.

В нашем случае:

$$\Delta_{АЦП} = \frac{5B}{2^{12} - 1} = \frac{5B}{4095} = 0,00122B = 1,22 мВ$$

Разрешающую способность АЦП зачастую и берут как аппаратную погрешность АЦП при расчётах.

```

53     Serial.println(Text);
54 };
55 void DOT1(unsigned long time) {
56     DOT1loop++;
57     int data = analogRead(PRESSURE_PIN1);
58     // 0 - 0,8 nA
59     float pressure = ((data - 102.4)/102.4)*(100000);
60     if (pressure < 0) {pressure = 0;};
61     String Text = "1;0;Pressure;" + String (pressure) + ";Pa;" + String(float (millis())/1000);
62     Serial.println(Text);
63     float temp1 = thermocouple1.readCelsius();
64     String Text = "0;1;Temperature;" + String (temp1) + ";Celsius;" + String(float (millis())/1000);
65     Serial.println(Text);
66 };
67 // Loop
68 void loop() {
69 };
70 // Timer0
71 ISR (TIMER0_COMPA_vect) {
72     DOT1time = millis();
73     if (DOT1time - 1000 * DOT1loop >= 1000) {
74         DOT1(DOT1time);
75     };
76     DOT0time = millis();
77     if (DOT0time - 1000 * DOT0loop >= 1000) {
78         DOT0(DOT0time);
79     };
80 };

```

Рисунок 3 – Программный код для микроконтроллера

Для достоверности данных очень важно, чтобы разрешающая способность АЦП была меньше погрешности датчиков. В случае с датчиком давления 40 мВ > 1.2 мВ, что является допустимым. В случае с модулем MAX6675 в АЦП приходит сразу цифровой сигнал и преобразования не требует.

Определение аппаратной погрешности измерительного канала представляет собой вычисление значений абсолютной и относительной погрешностей. Абсолютная погрешность измерительного канала является суммой абсолютных погрешностей АЦП (только для аналоговых датчиков) и погрешности самого датчика [9]:

$$\Delta = \Delta_{АЦП} + \Delta_{\delta}, \tag{6}$$

$$\Delta = 1,22 \text{ мВ} + 40 \text{ мВ} = 41,22 \text{ мВ}$$

где Δ – абсолютная погрешность измерительного канала, В;

$\Delta_{АЦП}$ – абсолютная погрешность АЦП, В;

Δ_{δ} – абсолютная погрешность датчика, В.

Рассчитываем относительную погрешность, которая является отношением абсолютной погрешности к действительному значению, выраженное в % [7]:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\%, \tag{7}$$

$$\delta = \frac{0,04122 \text{ В}}{5 \text{ В}} \times 100\% = 0,008244\%$$

где δ – относительная погрешность;

Δ – абсолютная погрешность;

x_0 – истинное значение измеряемой величины.

Для самого АЦП относительно опорного напряжения:

$$\delta_{ацп} = \frac{0,00122 \text{ В}}{5 \text{ В}} \times 100\% = 0,0244\%$$

Рассчитаем относительную погрешность для датчика давления относительно различных значений давления, приведенных в таблице 2. Используем формулу (7) подставляем соответствующие значения. Результаты расчетов представлены на рисунке 4 в виде графиков. На основании графиков аппроксимировали и получили зависимость погрешности от физических величин, представленную на рисунке 4.

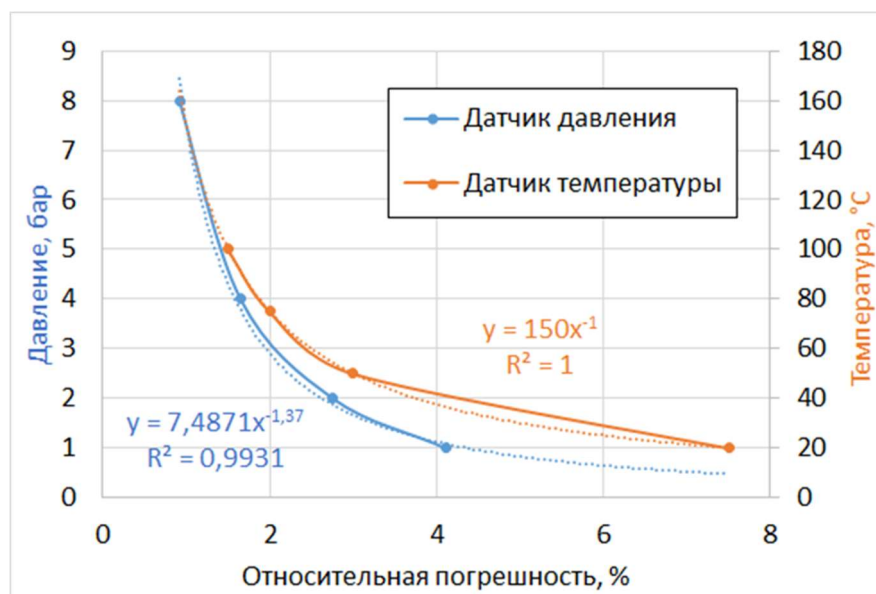


Рисунок 4 – Зависимости физических величин от погрешности

Из полученных графиков и выведенных зависимостей можно констатировать о том, что при измерении значений давления или температуры, находящиеся в не диапазона, указанного на датчики можно при помощи выведенных функций.

Выводы

Анализ полученных результатов дает возможность сделать следующие выводы;

- реализованная контрольно-измерительная система является работоспособной и имеет достаточную точность для проведения измерений с более высокими значениями давления (от 4 бар);
- для проведения измерений с более низкими давлениями потребуется замена датчика на более точный, а также замена Arduino на АЦП с более высокой разрядностью;
- рассмотренные виды погрешностей в дальнейшем позволят рационально скорректировать эксперимент, а так же сократить время его проведения и свести к минимуму ошибки.

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 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.
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.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 проведенного 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 объемов 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.

Введение

Современная промышленность в настоящее время переживает т.н. “Четвертую индустриальную революцию” и переходит в состояние “Индустрии 4.0” [1]. Такой переход связан со стремительным развитием технологий, в частности компьютерных. Цифровые решения находят применение практически в каждой области человеческой деятельности: управленческие, производственные процессы, коммуникация – все может быть оптимизировано с помощью компьютеров. Из-за своего непосредственного влияния на стабильность производственных процессов, проблемы диагностики и обслуживания промышленного оборудования являются одними из наиболее приоритетных для предприятий любого масштаба: от мелких частных производств до фабрик и комбинатов. Ввиду стремительного развития технологий традиционные методы диагностики и обслуживания зачастую становятся недостаточными для удовлетворения потребностей современного производства. Это обуславливает растущий интерес к применению методов машинного обучения для решения задач диагностики и обслуживания промышленного оборудования.

Традиционные методы диагностики и обслуживания промышленного оборудования обычно базируются на заранее заданных расписаниях технического обслуживания и регулярных инспекциях. Эти подходы, хотя и являются повсеместно применимыми для поддержания работоспособности оборудования, часто недостаточно эффективны в предсказании неожиданных сбоев или выявлении начальных стадий деградации. Такие методы часто не учитывают изменение условий эксплуатации.

Кроме того, традиционные методы могут оказаться ресурсозатратными и неэффективными в условиях переменных рабочих сценариев. Отсутствие возможности реагировать на изменяющиеся условия производственной среды может привести к простоям, дополнительным расходам на ремонт и ухудшению общей производственной эффективности.

Выделяют следующие стратегии эксплуатации:

1. R2F - Run 2 failure, работа до отказа;
2. Предупредительное обслуживание - замена наиболее уязвимых деталей заранее;
3. Обслуживание, основанное на состоянии;
4. Предиктивное обслуживание – продвинутая аналитика для прогнозирования

надежности машин.

В различных источниках возможно встретить разные обозначения, например, [2]:

1. реактивная (ремонт после поломки);
2. плановая;
3. проактивная (устранение неисправностей по мере их появления/предупреждение неисправностей/без отказа оборудования);
4. предиктивная (продвинутая аналитика для прогнозирования надежности машин).

Согласно предложенным схемам, процесс предиктивной диагностики состоит из следующих основных компонентов:

- a) “подключенное” оборудование (IoT);
- b) удаленный мониторинг;
- c) предиктивный анализ;
- d) автоматизированное обслуживание (система сама создает запросы на обслуживание, оператор их лишь подтверждает).

Исследователи Oudah A. и др. [3] приводят следующую схему (рисунок 1) для иллюстрации эффективности стратегий обслуживания.

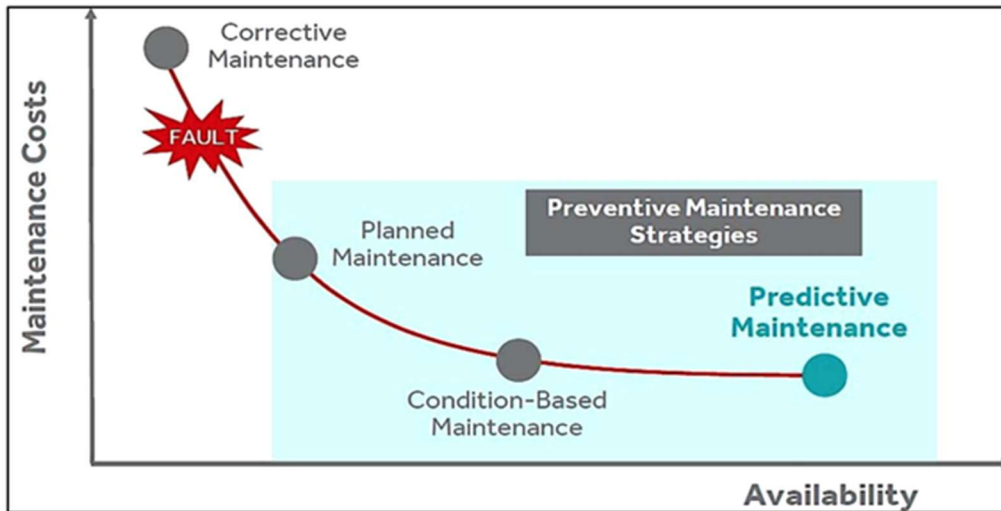


Рисунок 1 – Стратегии обслуживания в координатах «Стоимость обслуживания – доступность»

Deloitte [4] также описывает предиктивное обслуживание/диагностику как наиболее совершенную стратегию обслуживания, отмечая IoT и облачные вычисления как ее основные технологии (рисунок 2).

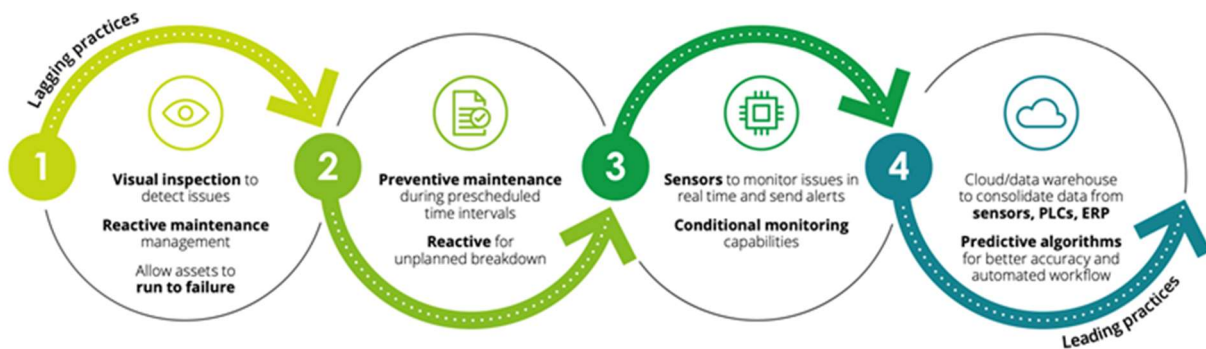


Рисунок 2 – Стратегии обслуживания от устаревающих методов к передовым

Зачастую на современных предприятиях условия, в которых работает оборудование, могут отличаться от рекомендуемых. Оборудование эксплуатируется с большими нагрузками длительное время, что закономерно может привести к отказам, выходу из строя, авариям. Крайне очевидно, что для диагностики оборудования необходимо получать данные о его состоянии. Выделяют несколько основных способов получения данных:

- Вибрационный анализ (анализ вибраций может предоставить информацию о различных аспектах состояния оборудования, таких как наличие износа, дисбаланса, несоосности, трещин и других дефектов)
- Термография (позволяет выявлять перегрев электрических соединений, износ подшипников, утечки тепла и другие неоднородности температуры)
- Акустический анализ (анализ частоты, интенсивности и формы звуковых сигналов позволяет выявлять характеристики, связанные с работой и состоянием оборудования).

– Анализ смазочных материалов (позволяет выявлять ранние признаки деградации масла, износа деталей и присутствие загрязнений, что может предсказать потенциальные проблемы в работе оборудования).

– Ультразвуковая диагностика (применяется для обнаружения трещин, пустот, деформаций, а также для измерения толщины стенок, например, в трубопроводах или резервуарах).

Получив массив данных большинство эксплуатирующих организаций не знают, что с ними делать и как их использовать. В этом им должно помочь машинное обучение, которое на данный момент широко распространено в предиктивных диагностиках. Машинное обучение нужно для того, чтобы создавать алгоритмы, которые могут обучаться на данных и использовать эту информацию для предсказаний или принятия решений.

Огромные массивы данных, собранных для машинного обучения, содержат ценные знания, которые могут улучшить продуктивность производственных процессов и динамики системы, также могут быть применены в других областях, по большей части в эксплуатации и мониторинге состояния.

Основная часть

Одним из наиболее популярных алгоритмов машинного обучения в предиктивной диагностике, можно считать ANN (Artificial Neural Network). Процесс обучения нейронных сетей обычно подразумевает подачу большого объема данных для обучения модели, алгоритмическое корректирование весов и параметров в процессе обучения с целью минимизации ошибки на выходе сети. Этот процесс часто реализуется с использованием алгоритмов обратного распространения ошибки (Backpropagation).

Известны ряд публикаций, где их авторы рассматривали методы машинного обучения, проведем анализ некоторых из них. Biswal and Sabareesh (2015) создали стенд для имитации операционных условий ветрогенераторов. Предложенная система распознает отказы в критических компонентах турбины. Авторы собрали данные с датчиков турбины ветрогенератора в ее нормальном и неисправном состояниях. ANN была использована для классификации характеристик нормального и неисправного состояний. Достигнута точность ANN в 92.6%. Kolokas et al. (2018) предлагают сети LSTM, тип рекуррентной ANN, для прогнозирования текущего состояния двигателя с помощью крупномасштабного механизма обработки данных Spark. В данном случае данные состоят из 3 рабочих настроек и 21 измерения датчиков температуры, давления двигателя и топлива, отбора охлаждающей жидкости. Другие основанные на ANN техники также называются техники глубокого обучения. CNN, например, была использована для прогнозирования отказов акустического датчика (Pan et al., 2017; Huuhtanen & Jung, 2018).

Модели ANN широко применяются во многих областях исследований благодаря их способности учиться на примерах. Кроме того, модели ANN по сравнению с другими традиционными алгоритмами машинного обучения имеют заметные преимущества при работе со случайными, нечеткими и нелинейными данными. ANN в первую очередь подходят для систем со сложной, крупномасштабной структурой и неясной информацией.

Hesser, D.F. and Markert, B. обучили модель ANN для классификации состояния инструмента фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ). Износ инструмента контролировался с помощью программируемой платформы, оснащенной встроенными датчиками. В ходе исследования производительность построенной модели сравнивалась и превосходила производительность моделей Support vector machine (SVM) и K-ближайших соседей (KNN).

Sampaio, G.S. et al. предложили методику для обработки и преобразования собранных данных измерений вибрации из вибрационной системы, моделирующей двигатель, и для создания набора данных для обучения и тестирования модели ANN, способной прогнозировать будущее состояние оборудования, прогнозируя, когда может произойти сбой. В исследовании была применена методология многослойного персептрона из-за ее более простой реализации и хорошего показателя генерализации.

Авторы [5] сравнили модель с другими ML алгоритмами. С точки зрения среднесрочного и долгосрочного прогнозирования ANN превосходит другие, тогда как

генерализация в краткосрочных прогнозах между ANN, Random forest и Regression tree была равной.

Support vector machines (SVM) - еще один широко применяемый и известный своей точностью (Sexton et al., 2017; Chang and Lin, 2011) метод машинного обучения для задач классификации и регрессии. Одна из основных характеристик - высокая точность в разделении различных классов данных (Susto et al., 2013).

Известен метод машинного обучения Random forest, который показывает хорошую производительность, когда число переменных больше, чем число сэмплов (Biau and Scornet, 2016). Модель Random forest применена Canizo et. al. (2017) в контексте мониторинга турбин ветрогенераторов. Основными результатами работы стали скорость обработки данных, масштабируемость системы и автоматизация. Модель демонстрирует 5,45% рост в точности прогнозирования в сравнении с более ранней работой (Kusiak & Verma, 2011). Исследование Su and Huang (2018) предлагает систему обнаружения отказов в реальном времени “HDPass” для жестких дисков. Сначала система обучалась на тренировочных данных, затем использовалась для прогнозирования в реальном времени. Показатель точности системы - 85%. Santos et al. (2017) предложил использование Random forest и Parks Vector для обнаружения короткого замыкания в обмотке статора в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. Kulkarni et al. (2018) применил Random forest для обнаружения наличия или отсутствия проблем в рефрижираторных установках. Paolanti et al. (2018) предложил Random forest модель для прогнозирования состояния машины на основе данных с различных датчиков, контроллеров и коммуникационных протоколов.

Отдельного внимания заслуживает метод машинного обучения Gradient Boosting Machine (GBM), который представляет собой семейство мощных ML алгоритмов, которые успешно применяются во многих областях. GBM объединяет предсказания нескольких слабых учеников (как правило, деревьев решений) для создания более сильной прогностической модели. Xiang, S. et al. предложили data-driven диагностический и прогностический фреймворк для увеличения эффективности машин и снижения стоимости эксплуатации с применением Gradient Boosting Machine.

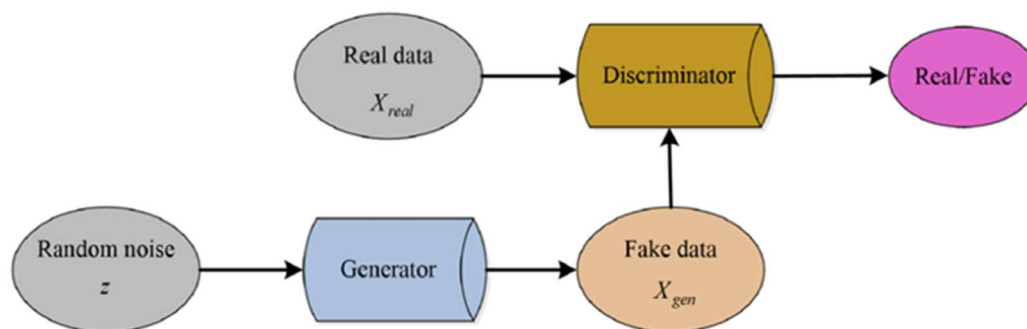


Рисунок 3 – Схема работы генеративно-сопоставительной сети

K-means - популярный алгоритм кластеризации. Легок в реализации, показывает хорошую производительность и способен работать с большими наборами данных (до тех пор, пока число кластеров мало). Хотя алгоритм k-means легко реализовать и понять, у него есть некоторые проблемы. К ним относятся: сложность определения количества кластеров (k); использование случайных начальных чисел в алгоритме может серьезно повлиять на конечные результаты; порядок ввода данных влияет на конечный результат; и алгоритм чувствителен к масштабу (то есть нормализация или стандартизация данных вызовет изменения в результатах).

Известен алгоритм машинного обучения, основанный на двух нейронных сетях (их комбинации): одна из них занимается генерацией образцов (G-сеть, генеративная модель), а другая (D-сеть, дискриминативная модель) пытается их отбраковать, сравнивая с «подлинными» - Generative adversarial network (GAN).

В исследовании [6] рассматривается пример применения GAN для обнаружения аномалий во вращающихся машинах. Предложенное решение включает в себя три шага: сбор и сегментация вибрационных данных в виде временных рядов, обучение модели и обнаружение аномалий с помощью предложенного метода PR-DRGAN. Для определения силы вибрации авторы используют PSD-RMS метод (power spectral density – root mean square). С помощью этих преобразований вибрационный сигнал сегментируется на конечные временные интервалы, получается ряд зависимости энергии вибрации от времени. Для сохранения свойств временной корреляции авторы используют обработку временного ряда с помощью LSTM (Long short-term memory). LSTM решает проблему градиентного взрыва и исчезновения градиента в RNN (Recurrent neural network). Подход исследователей объединяет GAN и LSTM алгоритмы для создания генеративных моделей данных. Авторам удалось достичь высокого качества реконструкции данных. Далее производится обнаружение аномалий с помощью вычисления ошибки. Предложенный подход PR-DRGAN позволяет определять аномалии без данных в неисправном состоянии оборудования, модель показала лучшие результаты в обработке не сглаженных сигналов по сравнению с другими методами обнаружения аномалий: AutoEncoder-LSTM, AutoEncoder-bidirectional LSTM, AutoEncoder-CNN-LSTM.

Широко известны модели цифровых двойников, которые создаются с использованием технологий компьютерного моделирования, интернета вещей (IoT), аналитики больших данных и искусственного интеллекта. Они позволяют создавать динамические виртуальные копии объектов, которые могут быть адаптированы к изменениям в реальном времени. Цифровые двойники могут быть использованы для оптимизации процессов, снижения затрат, улучшения качества продукции и повышения безопасности. Например, они могут помочь в оптимизации производственных процессов, управлении ресурсами, улучшении качества продукции и снижении затрат на обслуживание. В работе Dinter, R.V. и др. [7] исследователи фокусируются на изучении публикаций о применении модели цифровых двойников в предиктивной диагностике / обслуживании.

Criterion/ Algorithm	Decision trees	Neural networks	Naïve Bayes (NB)	Support Vector Machine (SVM)	KNN	Linear Regression	Logistic Regression	Random Forest	Boosting & AdaBoost
Algorithm Type	**	*	*	**	*	*	*	**	**
Parametrization (N)	***	*	***	*	***	***	**	***	**
Memory size (GB)	**	**	*	*	**	*	*	***	***
Tendency to overfitting %	***	**	**	***	****	*	*	***	**
Prediction / classification time (in seconds)	***	****	****	****	**	****	****	***	***
Learning time (in seconds)	***	*	****	*	****	**	**	***	**
Flexibility	***	***	**	***	****	*	*	***	***
Precision %	**	***	*	****	**	**	**	***	**
Ease of interpretation	****	****	**	***	***	****	****	***	**
Management of discrete / binary / continuous attributes	****	***	***	**	****	***	***	****	***
Scores	29	21	23	24	29	22	21	30	24

Рисунок 4 – Оценка алгоритмов машинного обучения

На данный момент не существует единого подхода к выбору модели машинного обучения. В рассмотренных выше работах могут использоваться совершенно разные подходы для решения схожих задач. Однако существуют публикации, которые непосредственно затрагивают процесс выбора подходящей модели. Например, в статье [3] описывается подход к выбору подходящего под конкретную задачу алгоритма машинного обучения. Приведено сравнение алгоритмов по различным критериям: тип алгоритма, параметризация, тенденция к переобучению, время прогнозирования/классификации, время обучения, гибкость, точность, простота интерпретации, управление дискретными/двоичными/непрерывными атрибутами.

Согласно определенной авторами шкале, каждый алгоритм был оценён по каждому из параметров и в конечном итоге был составлен рейтинг алгоритмов по количеству баллов.

Помимо выбора модели не менее важное значение имеет правильный подбор ее параметров. В работе [8] описаны метаэвристические алгоритмы для оптимального выбора признаков и классификации.

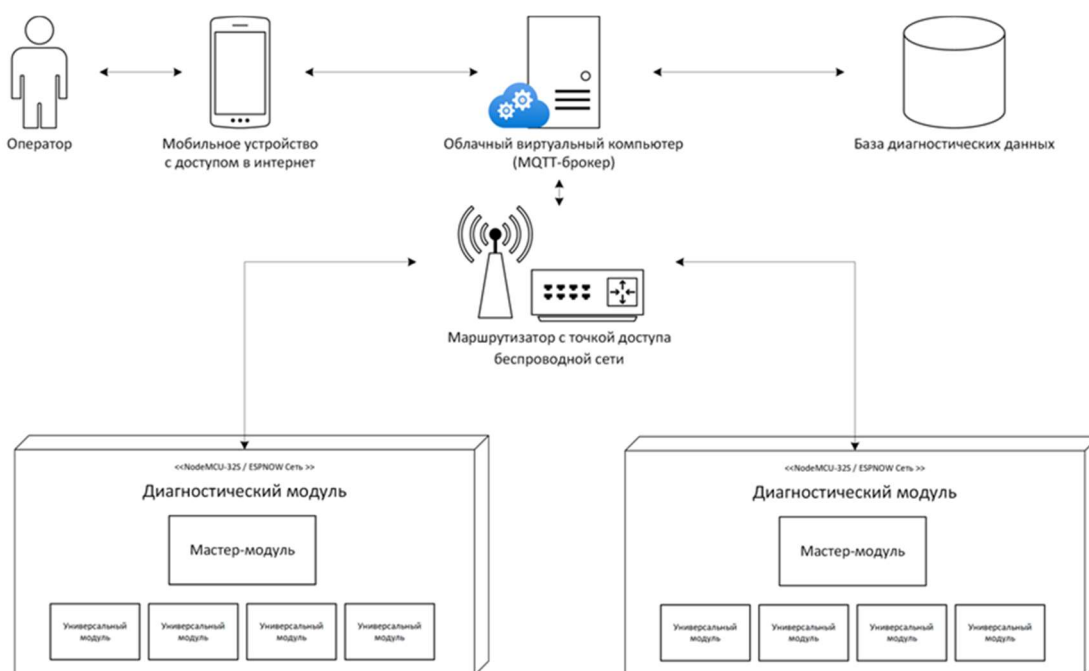


Рисунок 5 – Структурная схема предложенной системы предиктивной диагностики

Отдельное внимание стоит уделить производимым вычислениям и при использовании машинного обучения. Авторы [9] описывают облачные онлайн системы для предиктивной диагностики (на данных в реальном времени), противопоставляя их преимущества традиционному подходу, основанному на анализе собранных данных “оффлайн”. Авторы описывают проблемы создания подобной системы с точки зрения промышленной разработки, упоминая такие понятия как контроль качества, тестирование, совместимость, гибкость, масштабируемость, приводят пример контейнеризации с docker-контейнерами и Kubernetes.

Нельзя оставить без внимания «Туманные» вычисления (Fog-computing) — это технология распределенных вычислений, которая позволяет обрабатывать и анализировать данные ближе к источникам их генерации, таким как датчики, устройства и другие конечные точки. В статье [10] представлено управление ресурсами на основе генетического алгоритма (ГА), интегрированное с машинным обучением для прогнозного обслуживания в туманных вычислениях. Время, стоимость и энергетические характеристики ГА вместе с MinMin, MaxMin, FCFS, RoundRobin моделируются в FogWorkflowsim. Модель прогнозного обслуживания построена на основе двухклассовой логистической регрессии с использованием наборов данных в реальном времени. Результаты показывают, что предлагаемый метод превосходит MinMin, MaxMin, FCFS, RoundRobin по времени выполнения, стоимости и энергопотреблению. Время выполнения на 0,48% быстрее, затраты на 5,43% ниже, а потребление энергии на 28,10% ниже по сравнению со вторыми лучшими результатами. Точность обучения и тестирования модели прогнозирования составляет 95,1% и 94,5% соответственно.

Многие исследования посвящены теме интеграции «Интернета вещей» на производстве в концепции «Индустрии 4.0». Согласно выводам авторов [11, 12, 13, 14, 15], «Интернет вещей» играет ключевую роль в развитии технологий на производстве. Его основные преимущества заключаются в организации сбора данных в реальном времени, применение для задач предиктивного обслуживания / диагностики. Внедрение IoT на

производстве делает возможным использование описанных выше методов и концепций в реальных условиях.

Детальный анализ и сравнения методов машинного обучения позволил разработать концепцию системы предиктивной диагностики (рисунок 5).

Основы разработанной концепции нашли свое отражение в объектах интеллектуальной деятельности [16, 17, 18, 19].

Выводы

На основе результатов проведенного аналитического исследования можно сделать вывод, что использование машинного обучения в диагностике и обслуживании промышленного оборудования – перспективное направление для исследования. В целом, несмотря на ограничения, методы машинного обучения представляют собой мощный инструмент для современной диагностики и обслуживания промышленного оборудования, при условии компетентного подхода к их внедрению и эксплуатации.

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

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

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

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

Серебrenников Артем Дмитриевич

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

Rodicheva Irina Vladimirovna

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

Serebrennikov Artem Dmitrievich

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

Ivanov Oleg Anatolievich

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

Vasiliev Kirill Vladimirovich,

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

А.С. ФЕТИСОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ СЖАТИЯ

Аннотация. В статье представлена концептуальная модель демпфера сжатия, использующего магнитоэологическую жидкость в качестве рабочего тела. Рассмотрен ряд работ, посвященных магнитоэологическим демпферам сжатия, сделаны выводы о применимости магнитоэологических 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.

Введение

Разработка энергоэффективных и вибробезопасных технических устройств является одной из приоритетных задач машиностроения. Особенно в данной области актуальной является разработка новых демпфирующих устройств, которые могут применяться с используемых в настоящее время агрегатах. Конкретной задачей можно выделить разработку многорежимных или активных демпферов [1]. В области роторных машин разнообразие видов виброгасящих устройств значительно ограничено [2]. Целью данной работы является представление новой конструкции демпфера, работающего на принципе сжатия рабочего тела. Представляемый демпфер сжатия использует в качестве рабочего тела магнитоэологическую жидкость, применение которой позволяет добиться управляемости характеристиками демпфера.

Исследование характеристик магнитоэологических демпферов сжатия

Демпферы сжатия являются подробно исследованным объектом [3]. В пассивном варианте (без систем управления) подобные конструкции широко применяются в ракетном и авиационном машиностроении [4], при проектировании турбонасосных агрегатов [5] и т.д. Управление какой-либо характеристикой, как, например, давлением сжимаемой жидкости, как расширяет рабочие характеристики роторного агрегата, так и усложняет процесс проектирования за счет добавления дополнительной степени свободы [6]. Приведенный пример управления рабочими характеристиками демпфера сжатия за счет управления давлением рабочего тела имеет значительный недостаток в виде общей громоздкости и дороговизны оборудования, позволяющего реализовать управление. Другим подходом является применение «умных» конструкционных материалов, как, например, магнитоэологические или электрореологические жидкости. Магнитоэологические жидкости продолжительное время используются в линейных демпферах и амортизаторах [7]. Магнитоэологические жидкости работают в подобных конструкциях в режиме управляемого сдвига и позволяют варьировать демпфирование в широких диапазонах.

Другим режимом использования магнитоэологических жидкостей является режим сжатия [7]. Существует ряд конструкций, предназначенных для демпфирования нестационарной вертикальной нагрузки (опоры сооружений, подпятники вертикальных роторных машин), реализующих данный принцип [8,9]. Исследования, посвященные магнитоэологическим жидкостным демпферам сжатия (МРДС), предназначенным для поглощения радиальных нагрузок, носят по большей части прикладной характер. Работы П.Форте описывают динамику жесткого ротора на подшипниках качения (ПК), которые опираются на МРДС [10,11]. Конструкция экспериментального узла включает 2 электромагнита, создающие противоположно направленное электромагнитное поле. Эта же концепция МРДС показана в первых работах Я.Запомеля [12-17]. В данных работах

представлены 3 конструкции: 1) МРДС с двумя катушками [14,15]; 2) МРДС с одной катушкой, находящейся непосредственно над зазором МРДС [12,13,18]; 3) МРДС с одной катушкой, вынесенной за габариты демпфера и включенной в так называемый разомкнутый сердечник [16,17,19-21]. Не смотря на физически обоснованные различия в построении электромагнитного поля, математическое описание МРДС идентично во всех представленных работах автора. При описании динамического поведения жесткого ротора на МРДС авторы отмечают снижение максимальных амплитуд виброперемещений, сдвиг первой критической частоты в диапазон больших частот и увеличение динамических коэффициентов при увеличении силы тока электромагнита [12,13,17,18,20]. При рассмотрении динамического поведения гибкого ротора на МРДС авторы указывают на большое количество нелинейных эффектов, которые могут возникать в процессе активного виброгашения: разбалансировка роторной системы, хаотическое изменение фазового узла, нелинейность динамического поведения МРДС при высоких эксцентриситетах [14,19,22]. Подавляющая часть работ Я.Запомеля описывает роторные системы, опирающиеся на ПК, которые, в свою очередь, установлены в МРДС. С этим связана недостаточная глубина описания нелинейного поведения роторных систем с МРДС.

Исследования А.Охади посвящены влиянию активного демпфирования на динамическое поведение гибкого ротора, установленного на ПК [23-26]. В процессе исследований авторами получены следующие выводы: 1) наиболее эффективная стратегия для активных МРДС – полуактивное управление; 2) эффективным является управление в окрестностях только первой критической частоты; 3) температурные эффекты, ухудшают производительность МРДС и должны конструктивно учитываться. В работе [23] авторами произведена экспериментальная проверка на МРДС с двумя электромагнитными актуаторами.

В работах [27,28] также рассматривается динамика гибкого ротора на ПК, установленного в МРДС с двумя разнесенными катушками. Авторами показано, что с ростом напряженности электромагнитного поля возникают нелинейные эффекты, а именно: возникновение несинхронных колебаний, возникновение кратных гармоник, нелинейности переходных процессов при изменении характеристик электромагнита. Также авторы приходят к выводу, что применение активных МРДС эффективно в области первой критической частоты.

Таким образом, можно подвести промежуточный итог, заключающийся в актуальности области исследования МРДС. Активное управление характеристиками электромагнитов позволяет добиться требуемого виброгашения, а полуактивные режимы управления позволяют минимизировать нелинейные эффекты, возникающие в магнитореологической рабочей жидкости.

Концептуальная модель магнитореологического демпфера сжатия

Объектом настоящего исследования является роторная система, опирающаяся на МРДС. Рассмотренные выше работы позволяют сформулировать набор допущений, которые будут применены в рамках моделирования роторных систем на магнитореологических демпферах сжатия: 1) магнитореологическая жидкость является однородной средой, реологическое поведение которой описывается моделью Бингама; 2) реологические характеристики магнитореологической жидкости не меняются по толщине зазора МРДС; 3) течение магнитореологической жидкости изотермическое; 4) поверхности областей течения демпфера имеют идеальные цилиндрические формы, неидеальности, связанные с шероховатостями не учитываются. Рассмотрение влияния температуры, также, как и неоднородности характеристик магнитореологической жидкости, неидеальность геометрических форм демпфера, представляет отдельную научно-техническую задачу. Также в рамках создания математической модели принимаются допущения классической теории гидродинамики и роторной динамики [29, 34-36]. Также при формировании концептуальной модели необходимо учитывать влияние торцевых уплотнений на расход смазочного материала и увеличение эквивалентной жесткости демпфирующего устройства [12,13]. В МРДС для фиксации внутренней втулки от проворота помимо торцевых уплотнений используют S-образные пружины [30]. Дополнительные силы центрирования внутреннего кольца за счет уплотнений и пружин оказывают значительное влияние при высоких значениях

эксцентриситета, а при средних и низких значениях их влиянием можно пренебречь. Таким образом, с учетом предложенных допущений и ограничений область течения может быть представлена, как зазор между двумя несоосными невращающимися цилиндрами идеальной формы (рисунок 1). На течение действует радиально приложенное электромагнитное поле.

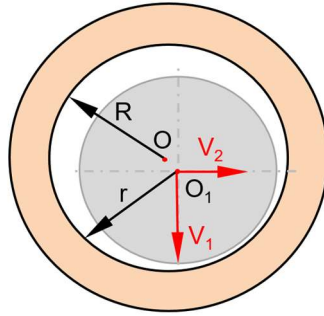


Рисунок 1 – Область течения МРЖ в МРДС

В общем случае гидродинамические течения МРЖ описываются уравнениями магнитной гидродинамики [31,32]

$$\begin{cases} (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{U} + \vec{j} \times \vec{B} \\ \nabla \cdot \rho \vec{U} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = q \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

где ρ - массовая плотность жидкости,
 \vec{U} - поле скоростей течения, P - давление,
 μ - коэффициент динамической вязкости,
 \vec{j} - плотность тока,
 \vec{B} - магнитная индукция,
 \vec{E} - напряженность электрического поля,
 \vec{H} - напряженность магнитного поля,
 \vec{D} - индукция электрического поля,
 q - плотность электрического заряда,
 \vec{j} - вектор плотности электрического тока

В подобной формулировке задача течения МРЖ может быть решена численными методами конечных элементов или контрольных объемов. Подобный подход приведен в работе [14]. Значительно чаще в исследованиях представлен подход, основанный на применении усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [11,12,20,24,27]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6U \frac{\partial h}{\partial x} - 12V, \quad (2)$$

где h - функция зазора,
 U и V линейные скорости поверхности вала.

Для учета реологического поведения МРЖ используется модель Бингама:

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}, \quad (3)$$

где τ_y - дополнительное касательное напряжение, зависящее от величины приложенного магнитного поля,

τ - общее касательное напряжение,

$\dot{\gamma}$ - производная скорости сдвига.

Таким образом реологическое поведение МРЖ описывается нелинейной характеристикой (рисунок 2).

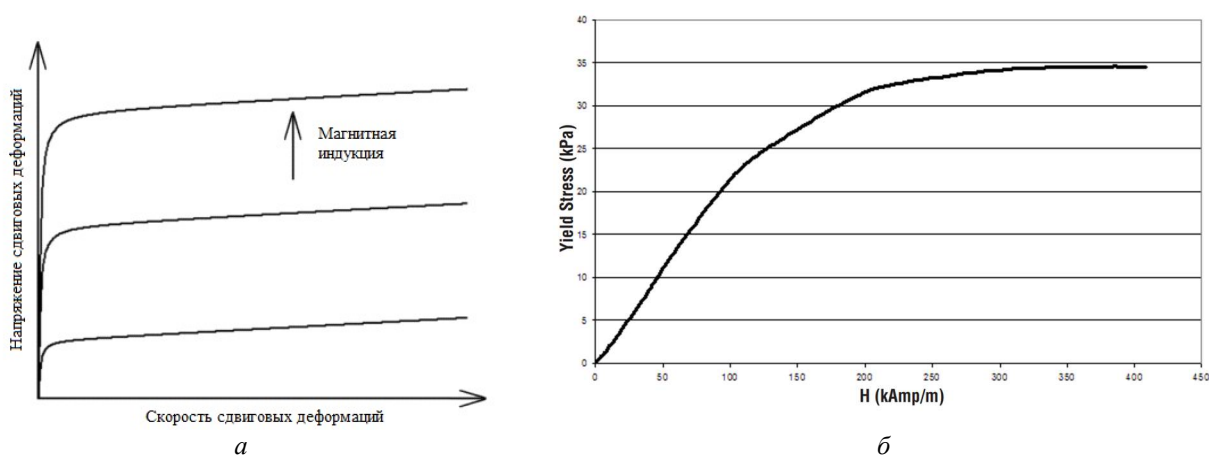


Рисунок 2 – Реологические характеристики МРЖ: а - реологическая кривая МРЖ при различных параметрах электромагнитного поля [16], б – зависимость дополнительных касательных напряжений от напряженности электромагнитного поля [33]

Так как управление реологическими свойствами МРЖ осуществляется путем изменения напряжения и силы тока на электромагнитном актуаторе, требуется произвести дополнительные расчеты магнитной цепи МРДС, которые позволят сформировать дополнительные зависимости напряженности электромагнитного поля от силы тока электромагнита.

Расчет магнитной цепи магнито-реологического демпфера сжатия

В рамках расчета магнитной цепи рассмотрены 3 наиболее часто встречающихся конструкции МРДС (рисунок 3). Особенностью конструкции №1 (рисунок 3,а) является расположение электромагнитного актуатора над зазором МРДС, что позволяет существенно сократить геометрические габариты демпфера. В данном случае катушка должна находиться в непосредственной близости к зазору, а материал, разделяющий электромагнит и зазор МРДС должен иметь крайне низкую магнитную проницаемость. Расположение катушки и выбор материала существенно влияют на расположение и форму линий магнитной индукции. Недостатком подобных техническим решений является то, что зазор МРДС используется не в полной мере (рисунок 4,а), а зона под электромагнитом не используется.

Конструкция №2 имеет в основе концепцию многополюсного электродвигателя или активного магнитного подшипника (рисунок 3,б). С этим связана возможность отдельного управления реологическими свойствами рабочего тела в локальных зонах зазора МРДС. Однако эффективность использования зазора МРДС ниже по отношению к варианту конструкции МРДС №1, а габариты больше (рисунок 4,б).

Конструкция №3 и 4 может иметь в своем составе как один, так и 2 электромагнитных актуатора. При оптимальном подборе геометрических размеров демпфера вариант с двумя катушками может обеспечивать равномерное распределение напряженности электромагнитного поля по зазору МРДС (рисунок 4,в-г).

Расчеты магнитной цепи производились с использованием САЕ-программного комплекса, использующего конечно-элементное программирование. Приведенные расчеты

показывают, что конструкция №3, несмотря на увеличенные осевые габариты, обеспечивает наилучшее распределение напряженности электромагнитного поля.

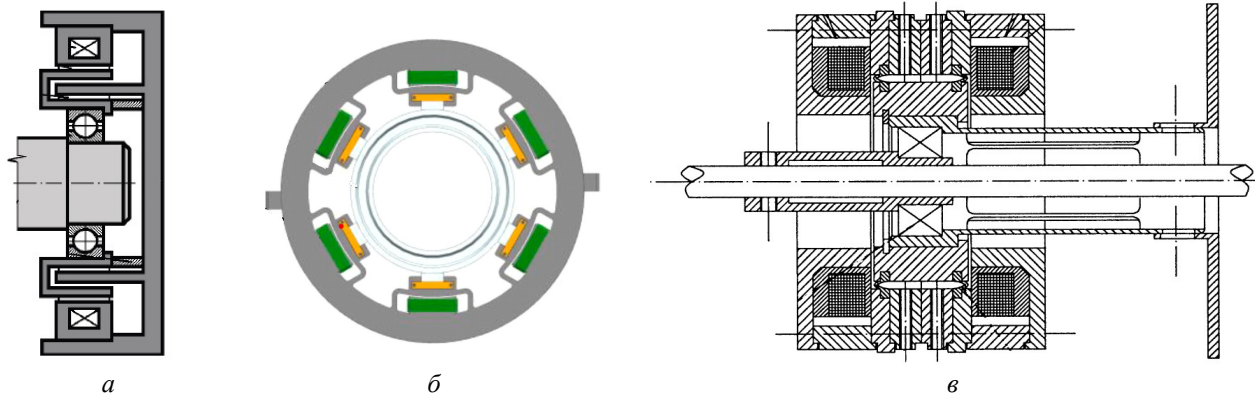


Рисунок 3 – Примеры конструкции МРДС: а – пример с катушкой, расположенной над зазором [12], б – пример с полюсным расположением электромагнитов [27], в – пример с двумя электромагнитами [11]

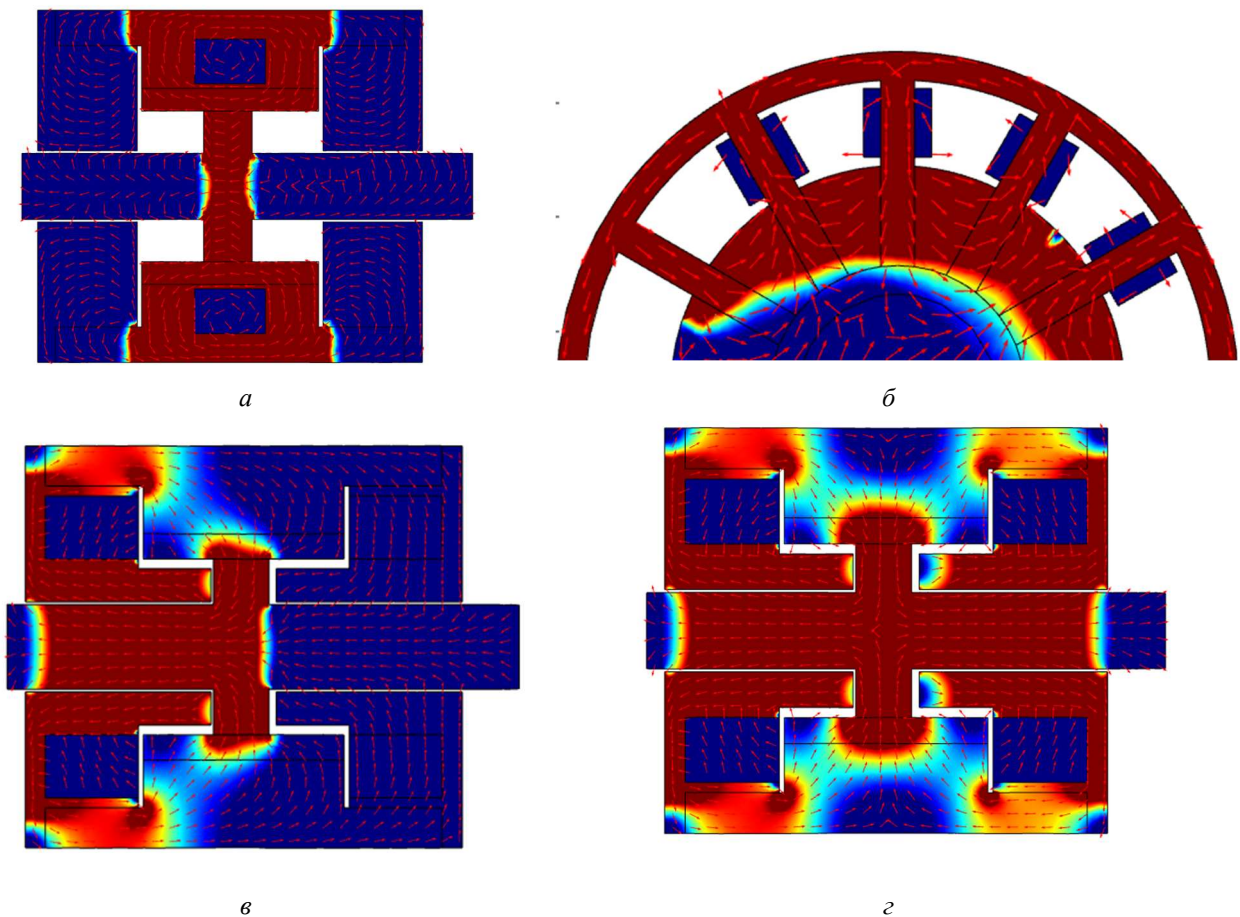


Рисунок 4 – Результаты расчета магнитной цепи для различных конструкций МРДС: а – конструкция с одной катушкой, расположенной над зазором МРДС, б – радиально направленные магнитопроводы МРДС, в – конструкция с одной катушкой, расположенной соосно с валом, г – конструкция с двумя катушками, расположенными соосно с валом

Конструкция магнитоэологического демпфера сжатия

С учетом представленных выше результатов расчетов, на основании рассмотренных конструкций магнитоэологических демпферов сжатия была предложена концепция триботронного роторно-опорного узла (рисунок 5).

В состав данного триботронного узла входит: 1 – корпус, выполненный из магнитомягкого материала, 2 – крышка с пазом для электромагнитного актуатора, 3 – электромагнит, 4 - внутреннее кольцо демпфера, 5 – магнитоэологическая жидкость,

находящаяся в зазоре жидкостного демпфера, 6 – уплотнительные торцевые кольца, 7 – подшипник качения, 8 – вал, 9 – палец. Особенностью предложенного узла является возможность использования в качестве опорного элемента гидродинамических подшипников жидкостного трения для проведения исследований нелинейных эффектов роторной динамики. Также в конструкции предусмотрены каналы подвода магнито реологической жидкости. В случае необходимости имеется возможность использования узла без торцевых уплотнений, так как внутренняя втулка защищена от проворота при помощи пальца.

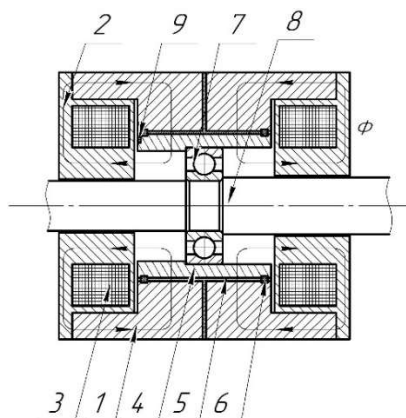


Рисунок 5 – Эскиз исследуемого МРДС

Выводы

В рамках данного исследования был проведен анализ исследований в области активного демпфирования вибрации роторного оборудования. Был выделен особый вид активных демпферов, основанных на сжатии магнито реологической жидкости. Был проведен анализ конструкций подобных демпферов и выделены несколько перспективных разновидностей. Для каждой конструкции был проведен анализ магнитной цепи демпфера, на основании чего была сформирована концепция триботронного узла. Анализ исследований в области МРДС позволил сформулировать комплекс допущений и граничных условий в виде концептуальной модели, а также сформировать основные расчетные соотношения, на основе в дальнейших исследованиях которых будет построен комплекс математических моделей, описывающих магнито реологические демпферы сжатия.

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. 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, Jiakuan & Yang, Jianwei & Li, Xin. (2023). Recent Structural Developments and Applications of Magneto rheological 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 magneto rheological 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. Серебрянников // 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 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.

36. 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.

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.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.ijmecs.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.ymsp.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.: Vysshaye. 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

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.

Характеристика проблемы

В настоящее время в конструкции экипажной части зарубежного высокоскоростного подвижного состава широко применяются сферические резинометаллические шарниры (РМШ), которые позволяют исключить пары трения в шарнирно-поводковых механизмах (буксовые поводки, подвеска осевого редуктора и т.п.). Основные достоинства сферических РМШ следующие:

- при угловом перекосе шарнира в сферическом резиновом слое возникают только деформации сдвига, что позволяет при той же способности шарнира воспринимать радиальную нагрузку, увеличить величину допустимого перекоса и снизить сопротивление перекоосу;

- фактор формы, определяемый соотношением площади сечения поверхности, воспринимающей радиальную нагрузку, к площади свободной поверхности резинового слоя [1], для сферического РМШ выше, чем для цилиндрического, в результате чего при одинаковых наружных размерах и допустимом угле поворота сферический РМШ может выдержать более высокую нагрузку.

Ранее авторами были рассмотрены вопросы использования сферических РМШ в узлах отечественных локомотивов [2, 3], в частности, особенности их применения при внедрении бесколлекторных тяговых электродвигателей [4].

В зарубежной практике обычно применяются трехсегментные сферические РМШ с радиальными разъемами (рисунок 1, а), на подвижном составе отечественной разработки – шарниры с осевым разъемом (рисунок 1, б).

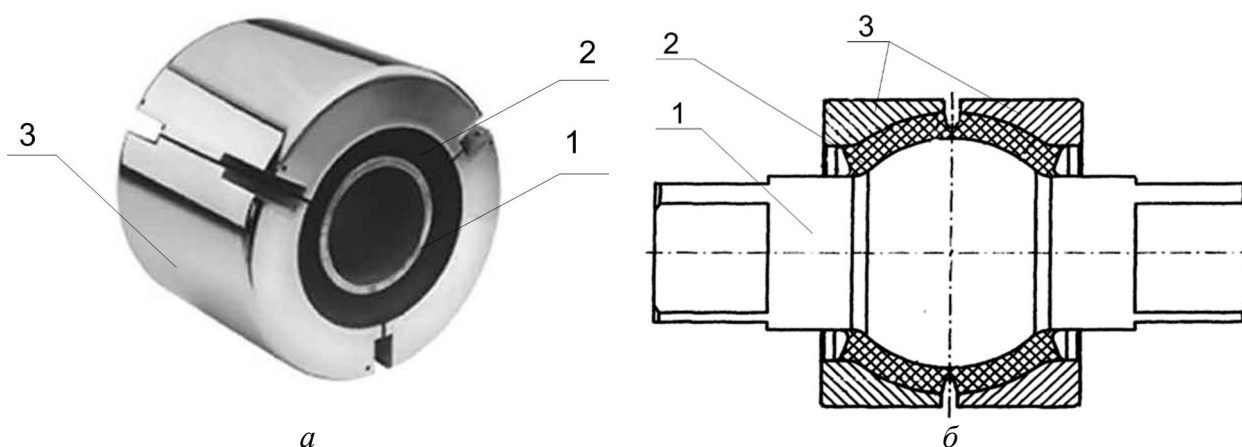


Рисунок 1 – Сферические РМШ:

а – с радиальными разъемами и внутренним отверстием для крепления на валике; б – с осевым разъемом и клиновым креплением; 1 – внутренняя обойма; 2 – резиновая втулка; 3 – наружная обойма

Использование в отечественной практике схемы с осевым разъемом было вызвано необходимостью быстро создать в середине 80-х годов прошлого века конструкцию РМШ для

подвесок тяговых электродвигателей (ТЭД) и осевых редукторов, обеспечив возможность изготовления на неспециализированных предприятиях и простоту монтажа при минимуме приспособлений [5, 6].

Основным недостатком РМШ с осевым разъемом является то, что радиальный предварительный натяг резинового элемента при монтаже достигается косвенным путем, за счет деформации сдвига, при этом деформация сдвига принимается равной утроенной предварительной деформации сжатия. Для шарниров подвески 2ТЭ25А и 2ЭС6 эта деформация равна 3 мм, что соответствует углу перекося $\nu = 0,054545$ рад. Касательные напряжения в резине в месте вулканизации без учета выдавливания излишков резины в стороны от выемки, можно определить по формуле, приведенной в [5]:

$$\tau = 3\nu GR_1^3 R_2^{-3} \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^3 - 1 \right] \quad (1)$$

При $G = 2,05$ МПа получаем $\tau = 2,8$ МПа.

Как указано в [7], для деталей с фактором формы более 1,5 прочность начинает определяться прочностью соединения резины с металлом. Согласно [5], прочность соединения резины из синтетических каучуков с металлом с помощью клея «Лейконат» для разных резиновых смесей может колебаться от 3 до 10 МПа. Таким образом, для сферических РМШ с осевым разъемом важно обеспечить максимально прочное соединение резины с металлическими обоймами (латунирование, дробеструйная обработка поверхностей и т.п.). Как показала практика, характерным дефектом сферических РМШ подвесок локомотивов ЭП1, 2ЭС6, 2ТЭ25А, является отслоение резинового элемента от наружной обоймы и выдавливание резины за торец поводка [9 – 11].

Из сказанного следует, что несущая способность сферических РМШ зависит от рационального выбора предварительной деформации резинового элемента Δ_p при изготовлении и монтаже. Для РМШ без вулканизации резинового элемента к арматуре $\Delta_p = 0,3 \dots 0,5$, поскольку резиновый элемент удерживается в арматуре с помощью трения. Для РМШ с односторонней вулканизацией резинового элемента величина Δ_p принимается от 0,33 до 0,15...0,17 при рациональной форме элемента [12]. В [5] величина Δ_p принята равной 0,1. Таким образом, как эмпирически, так и теоретически для резиновых элементов с высоким фактором формы и двусторонней вулканизацией резинового элемента целесообразно принимать $\Delta_p = 0,1$, что позволит избежать значительных напряжений сдвига при перетекании несжимаемой резины в сторону свободной поверхности. В этом случае для РМШ с осевым разъемом, как уже упоминалось выше, необходимо принимать величину предварительной осевой деформации $\Delta_0 = 3\Delta_p$, что и соответствует 3 мм, для РМШ подвески 2ТЭ25А и 2ЭС6. Таким образом, уменьшение предварительной осевой деформации РМШ с осевым разъемом невозможно.

Для трехсегментных РМШ, производимых зарубежными фирмами, величина зазоров между сегментами обоймы перед монтажом, составит

$$\Delta = \frac{2}{3} \pi \Delta_p (R_1 - R_2) \quad (2)$$

или для РМШ подвески 2ТЭ25А и 2ЭС6 $\Delta = 2,09$ мм, что почти втрое меньше величины зазора в РМШ с осевым разъемом. Отсюда следует, что отечественные РМШ с осевым разъемом при использовании в экипажной части высокоскоростного подвижного состава будут уступать зарубежным трехсегментным по показателю надежности.

Пути решения проблемы

Поскольку задачей развития отечественного транспортного машиностроения является создание подвижного состава, не уступающего, а превосходящего по своим качествам зарубежный, предлагается решить данную проблему путем увеличения числа слоев резины и металла в шарнире.

В авиационной промышленности для втулок несущих винтов вертолетов нашли применение многослойные сферические РМШ (тонкослойные резинометаллические элементы

– ТРМЭ) [13], состоящие из склеенных между собой чередующихся сферических слоев резины толщиной 1...1,2 мм и металла толщиной 0,8...1 мм, при числе слоев не менее 20 (рисунок 2). Недостатком таких конструкций является существенное усложнение изготовления, поскольку при изготовлении промежуточной арматуры из листового металла требуется не менее 20 разных штампов, либо один сложный штамп, с помощью которого изготавливается не менее 20 разных сферических слоев арматуры. Кроме того, подобные сферические шарниры, изготавливаемые для втулок несущих винтов вертолетов, фактически представляют собой подпятники конической формы, в то время как для узлов подвижного состава в основном требуются РМШ, имеющие вид втулок.

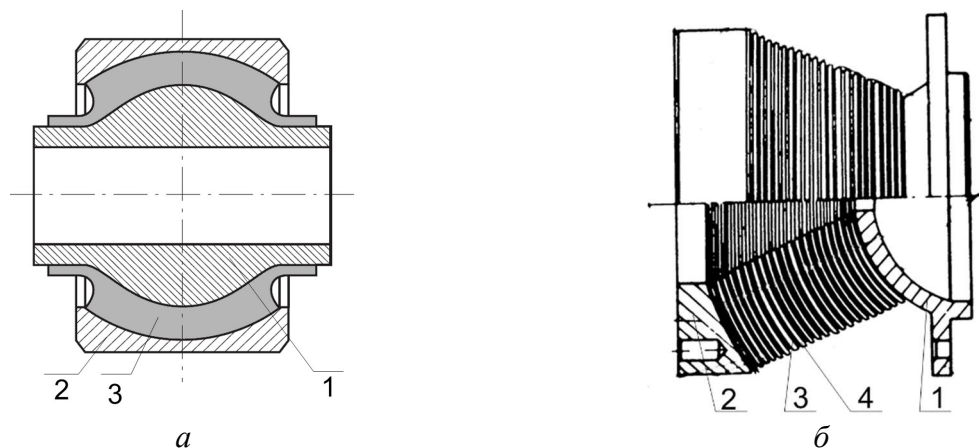


Рисунок 2 – Схемы сферических РМШ:

а – однослойного; б – ТРМЭ; 1 – внутренняя обойма; 2 – наружная обойма; 3 – резиновый слой; 4 – промежуточная обойма (арматура)

В связи с этим предлагается уменьшить число промежуточных слоев арматуры до минимума (один слой промежуточной арматуры, два слоя резины), что облегчает изготовление шарнира путем литья резиновой массы в пресс-форму, и ограничиться двумя радиальными разрезами, плоскость которых ориентирована перпендикулярно направлению нагружающей силы (рисунок 3), поскольку шарниры деталей экипажной части подвижного состава, для которых, как правило, основная нагрузка направлена вдоль одной оси. При сборке такой шарнир требуется ориентировать относительно детали, куда он монтируется, но, с другой стороны, разъем при этом располагается в зоне наименьших радиальных деформаций резины, что благоприятно сказывается на ее долговечности.

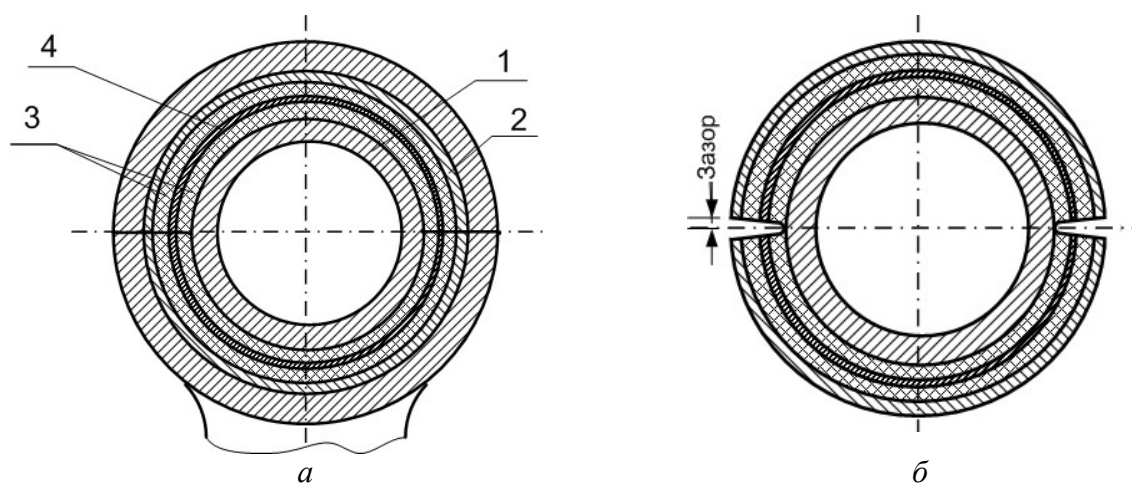


Рисунок 3 – Схема двухслойного РМШ с радиальным разъемом:

а – в сборе; б – перед установкой; 1 – внутренняя втулка; 2 – наружная втулка; 3 – резиновые слои; 4 – арматура

Для сравнения несущей способности однослойных и двухслойных РМШ в Брянском государственном техническом университете (БГТУ) было проведено исследование радиальной жесткости шарнира путем математического моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ) [14] для трехмерной модели, с наружными размерами и углом раскрытия, соответствующими однослойному шарниру, примененному для подвески ТЭД тепловоза 2ТЭ25А и электровоза 2ЭС6. Результаты расчета приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты исследования радиальной жесткости однослойного шарнира

Однослойный шарнир				
Твердость по Шору, ед.	Е, МН	Смещение центрального узла Δ, мм	Сила реакции Р_р, кН	Радиальная жесткость С_р, кН/мм
60	2,7	1	56,17	56,17
65	3,18	1	66,15	66,15
70	3,8	1	79,05	79,05
75	4,64	1	96,52	96,52
80	5,86	1	121,9	121,9

Таблица 2 – Результаты исследования радиальной жесткости двухслойного шарнира

Двухслойный шарнир				
Твердость по Шору, ед.	Е, МН	Смещение центрального узла Δ, мм	Сила реакции Р_р, кН	Радиальная жесткость С_р, кН/мм
60	2,7	1	359,85	359,85
65	3,18	1	421,68	421,68
70	3,8	1	504,63	504,63
75	4,64	1	616,22	616,22
80	5,86	1	776,59	776,59

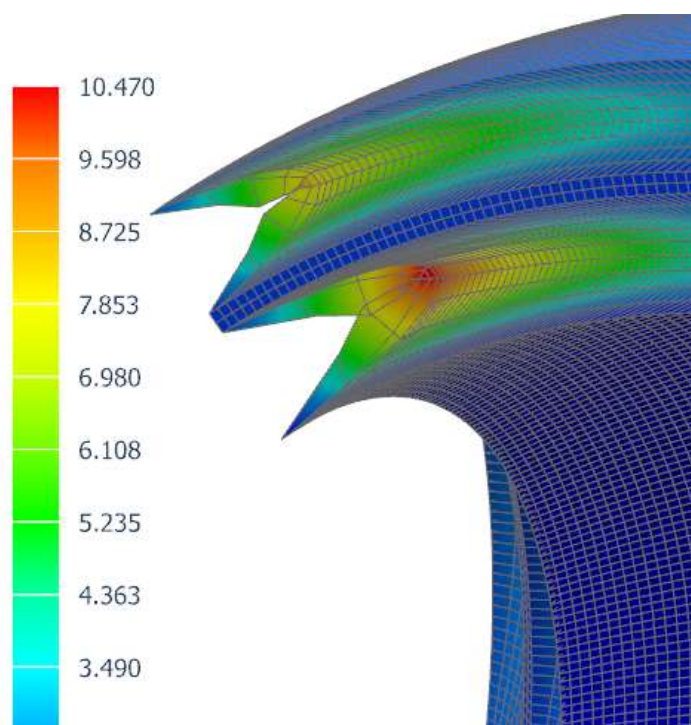
При твердости резины 75 ед. по Шору, для которой значение радиальной жесткости однослойного шарнира 96,52 кН/мм близко к экспериментально полученной величине жесткости 92 кН/мм шарнира подвески тепловоза 2ТЭ25А, радиальная жесткость двухслойного шарнира составила 616,22 кН/мм. Из этого следует, что двухслойный сферический РМШ при равных размерах с однослойным будет иметь нагрузочную способность в 6,3 раз выше, без ухудшения компенсирующей способности [14]. При твердости резины 70 – 80 ед. по Шору и размерах, как у шарнира подвески тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6 (наружный диаметр 120 мм) радиальная жесткость шарнира должна в среднем составить примерно 620 кН/мм, что почти втрое выше радиальной жесткости шарнира 13-4007 фирмы Trelleborg Antivibration Solutions (Швеция), имеющего наружный диаметр 127 мм, и в 7 раз выше радиальной жесткости шарниров 13-1180 и 13-2624 тех же размеров того же производителя. Таким образом, двухслойные шарниры, оставаясь технологически близкие к однослойным, позволяют существенно превзойти по нагрузочной способности шарниры зарубежных производителей, при использовании отечественных материалов и комплектующих изделий и отечественной технологической базы.

Подобные свойства шарнира особенно важны для экипажной части высокоскоростного подвижного состава, поскольку позволяют либо уменьшить габариты и массу шарнирного узла по сравнению с зарубежными аналогами, либо увеличить допустимые углы поворота и перекоса шарнира, что также важно для высокоскоростных тележек, где необходимо обеспечить компенсацию значительных вертикальных и горизонтальных перемещений деталей при меньших размерах тележек по сравнению с локомотивными.

Особенности технической реализации и состояние работ

В настоящее время основным препятствием к внедрению двухслойных сферических РМШ на высокоскоростном подвижном составе является отсутствие апробированной методики их проектирования и расчета. Метод расчета однослойного сферического РМШ был предложен в 80-х годах прошлого века во ВНИКТИ В.С. Коссовым для шарниров с углом раскрытия 90° [5, 6], однако насколько он применим для двухслойных сферических РМШ, имеющих другой коэффициент формы, на данный момент не установлено. Также во ВНИКТИ была предложена и запатентована форма выемки в резиновом слое при осевом разьеме [15], но нет оснований считать ее рациональной для варианта радиального разьема.

В БГТУ в ходе исследований было установлено, что для формы свободной поверхности двухслойного шарнира перед монтажом характерна меньшая глубина требуемой выемки по сравнению с однослойным, однако при этом значительно уменьшаются радиусы при вершине выемки (рисунок 4).



*Рисунок 4 – Перемещение узлов поверхности свободной грани трехслойной втулки:
Размер конечного элемента – 0,5 мм*

Это обусловлено снижением возможности перемещения резины в двухслойном шарнире по сравнению с однослойным, что создает условия для образования локальных зон растяжения на середине свободной поверхности после сборки шарнира. Возможно, по этой причине потребуется снижение максимальных радиальных деформаций резинового слоя при работе. Данный вопрос требует дальнейших исследований.

Из сказанного следует, что при проектировании двухслойных РМШ одной из основных проблем является обеспечение возможности разьема деталей литьевой или плунжерно-литьевой прессформы, которая, как видно из рисунка 4, должна обеспечивать внутренние кольцевые поднутрения. В связи с этим авторами, на основе ранее разработанной им методологии поиска новых технических решений [16] была предложена конструкция двухслойного сферического РМШ с разьемом, упрощающая технологию изготовления, на которую получен патент на полезную модель [17].

Еще одной проблемой двухслойного сферического РМШ является то, что при простом разделении резиновой втулки посередине арматурой и одинаковых углах раскрытия обоих слоев относительная деформация резины внутренней втулки выше, чем наружной. При размерах шарниров, соответствующих применяемым в экипажной части локомотивов,

наблюдается разница относительной деформации внутренней и наружной втулки примерно в 1,5 раза.

Самым простым способом решения данной проблемы является выбор параметров шарнира по условию обеспечения допустимой относительной деформации внутренней втулки, что, с практической точки зрения, в большинстве случаев приемлемо, учитывая то, что несущая способность двухслойного РМШ многократно больше однослойного.

Анализ конструкции сферического двухслойного РМШ показал, что достижение одинаковой относительной радиальной деформации наружной и внутренней резиновых втулок может быть достигнуто следующими путями:

- а) применением для наружной и внутренней втулок резины разной твердости при равной толщине втулок и равных углах их раскрытия;
- б) изменением фактора формы для наружной втулки за счет уменьшения угла ее раскрытия;
- в) различной толщиной наружной и внутренней втулок;
- г) увеличением свободной поверхности наружной втулки, например, за счет неполного замыкания частей втулки при монтаже РМШ.

В результате моделирования методом МКЭ [18] были получены параметры формы шарнира, достигаемые за счет уменьшения угла раскрытия наружной втулки (рисунок 5, таблица 3).

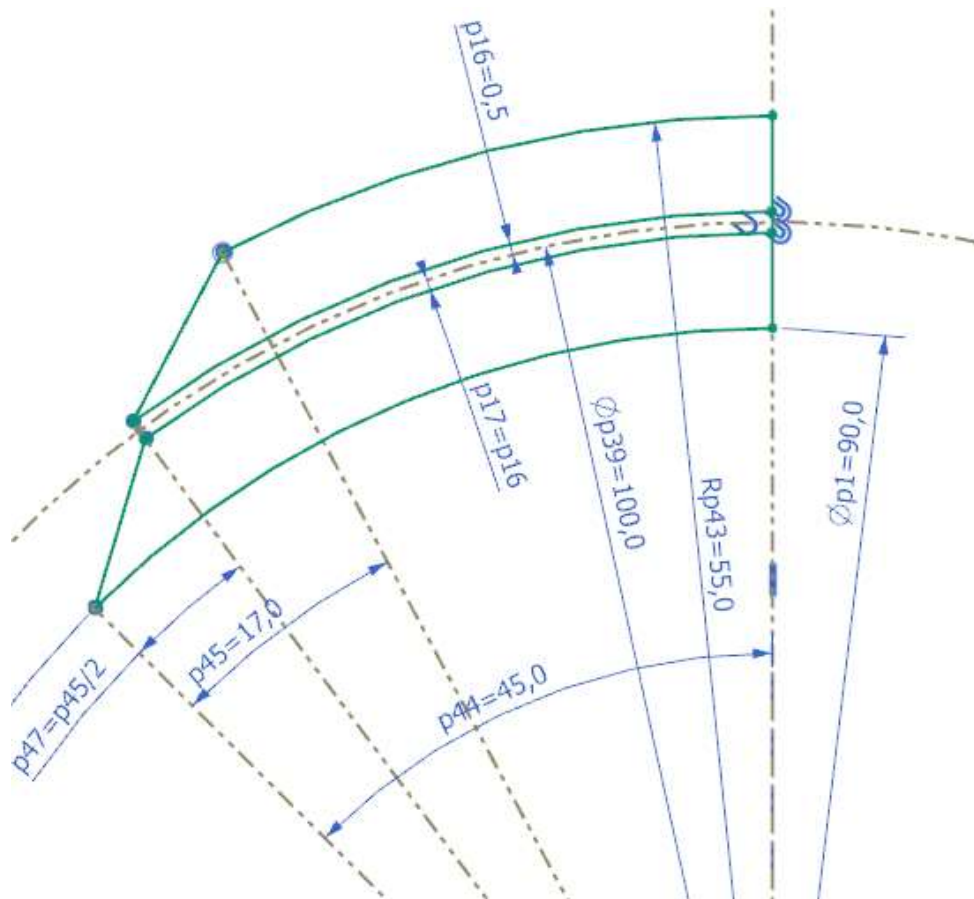


Рисунок 5 – Параметры формы шарнира, имеющего равноупругие резиновые слои

Как видно из таблицы 3, для достижения равноупругости, угол раскрытия наружной арматуры должен быть примерно в 1,5 раза меньше угла раскрытия внутренней. Это позволяет более чем на 25 % уменьшить ширину наружной арматуры РМШ, снизить массу детали, а также облегчает заполнение пространства между втулок резиновой массой при изготовлении шарнира.

Таблица 3 – Значения параметров шарниров с равноупругостью резиновых слоев

Радиальная жесткость, кН/мм	232,6	217	188,2	160,5	136,1	118,6	97,6
Угол раскрытия внутренней втулки, град.	90	85	80	75	70	65	60
Угол раскрытия наружной втулки, град.	56	55	52	49	46	44	41

К недостаткам данной конструкции РМШ следует отнести то обстоятельство, что при предварительной деформации резиновых втулок в ходе монтажа, а также при воздействии радиальных нагрузок давление изнутри на края промежуточной обоймы, создаваемое внутренней резиновой втулкой, не будет компенсироваться давлением снаружи, так как край промежуточной обоймы находится под свободной поверхностью наружной резиновой втулки. Это означает необходимость исследования напряженного состояния промежуточной обоймы для определения ее прочности и жесткости, и, возможно, увеличения толщины краев обоймы, что является задачей дальнейших исследований. С использованием той же модели в БГТУ был проведен поиск равнодеформированного состояния резины при различных значениях толщин резиновых втулок для сферического двухслойного РМШ с углом раскрытия упругих втулок 90°. Было установлено, что равноупругость втулок шарнира может быть достигнута за счет их разной толщины, при этом для достижения неравножесткости втулок в пределах $\pm 5\%$ требуется обеспечить отклонение диаметра промежуточной обоймы менее чем на $\pm 0,1\%$ при изготовлении шарнира.

Полученные результаты исследований доказывают практическую возможность создания равнопрочного (с равной жесткостью втулок) сферического двухслойного РМШ. Вопрос поиска компромиссной конструкции РМШ, приемлемой с точки зрения нагруженности промежуточной обоймы и требований к точности изготовления, требует дальнейшего изучения.

Выводы и предложения

1. В качестве полноценной замены сферических резинометаллических шарниров зарубежного производства в узлах экипажной части высокоскоростного подвижного состава предлагается использовать двухслойные сферические резинометаллические шарниры, которые, по результатам моделирования, должны иметь нагрузочную способность при приложении радиальных нагрузок в 6,2 раза больше, чем используемые сейчас однослойные. При этом сохраняется возможность изготовления таких шарниров при помощи существующей технологии литья резины в пресс-формы с вулканизацией к деталям арматуры шарнира. Предлагается использовать конструкцию шарнира с радиальным разъемом, плоскость которого перпендикулярна направлению приложения радиальной нагрузки.

2. Основным препятствием к использованию двухслойных сферических резинометаллических шарниров является отсутствие апробированной методики их проектирования и расчета, в связи с чем предлагается создать опытные образцы таких шарниров и провести экспериментальные исследования для проверки их математических моделей.

3. Установлено, что для сферических двухслойных РМШ при равной толщине слоев резиновых втулок и равном угле их раскрытия наблюдается существенное отличие в их радиальной жесткости и относительной деформации резины. При размерах шарниров, соответствующих применяемым в экипажной части локомотивов, наблюдается разница относительной деформации внутренней и наружной втулки примерно в 1,5 раза. Вследствие этого нагрузочную способность сферических двухслойных РМШ необходимо определять по величине относительной деформации резины наиболее нагруженной втулки.

4. Предложены варианты конструкции сферических двухслойных РМШ, обеспечивающие равноупругость втулок шарнира.

5. Учитывая тот факт, что сферические двухслойные РМШ в настоящее время пока не производятся зарубежными фирмами, их производство в России позволит обеспечить конкурентные преимущества отечественному высокоскоростному подвижному составу.

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

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. – M.: Mashinostroenie, 1966. – 299 s.
2. Modernizaciya kolesno-motornogo bloka elektrovoza 2ES6 / V.I. Vorobeve, 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). – S. 131-139.
3. Tyagovyy privod lokomotivov s vysokomomentnym kollektornym tyagovym elektrodvigatelem / O.V. Dorofeev, V.I. Vorobeve, M.I. Borzenkov, O.V. Izmerov, S.N. Zlobin // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. Turgeneva, 2021. – № 2 (346). – S. 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 rezinometallicheskimi sharnirami 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. Povyshenie 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 ekspluatcii (na primere 2ES6) / S.B. Ahmadeev, A.M. Kornev // Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie 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 rezinometallicheskimi elementami: 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. Vorobeve, 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 / Vorobeve V.I. [i dr.].
18. Voprosy sozdaniya ravnoprochnyh dvuhslojnyh sfericheskikh rezinometallicheskih sharnirov / A.S. Kosmodamianskij, V.I. Vorobeve, 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

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.

Введение

В современном обществе телемедицина является неотъемлемой частью жизни стационарных пациентов, а использование телемедицинских систем и технологий позволяет врачам-кардиологам осуществлять медицинское наблюдение, не покидая рабочего места клиники. Возможность контролировать определенные аспекты здоровья пациента, не выходя из дома, становится все более популярным вариантом телемедицины. Дистанционный мониторинг пациентов позволяет поставщикам медицинских услуг управлять острыми и хроническими состояниями сердечной системы.

Данный аспект сокращает не только транспортные расходы пациентов, но и создает возможность для консультации пациента не только со своим лечащим врачом, но и с другими квалифицированными специалистами из разных областей и городов, которые зачастую, в силу своей занятости, не могут выезжать за пределы клиники.

В этой статье описан эффективный алгоритм сжатия и передачи данных ЭКГ, основанный на алгоритмах с использованием сжатия и реконструирования RLE и DWT [1]. Степень сжатия, обеспечиваемая алгоритмами RLE и DWT, относительно высока при низких значениях среднеквадратичной разности в процентах.

Более того, поскольку алгоритм может сжимать и передавать данные в режиме реального времени, он может служить оптимальным методом передачи данных биосигналов для связи с ограниченной полосой пропускания между устройствами электронного здравоохранения [2], а также используя персональные данные мониторинга пациента, повышает качество диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

В работе акцент направлен на передачу данных ЭКГ аритмии, точнее всех возможных ее классификаций. Соответственно, для анализа определенной разновидности аритмии необходим блок «данных и анализа» с возможными отклонениями не только по амплитуде, но и по временному диапазону показателей ЭКГ, т.е. база амплитудно-временной классификации аритмии [3].

Материалы и методы

Передача электрокардиограммы человека в современном обществе является полезна при мониторинге состояния сердечно-сосудистой системы. Благодаря инфраструктуре

Интернета, мобильной связи и глобальной телефонной сети существует передача данных по протоколу TCP/IP, которая обеспечивает доступ ко многим базам данных при очень низких затратах. С помощью интеллектуальных агентов можно значительно улучшить мониторинг и снизить стоимость сеансов терапии.

Существует специальное телемедицинское оборудование, осуществляющее сбор и передачу медицинских данных пациента из его дома в отдаленный телемедицинский центр для дальнейшей обработки специалистами, обеспечивающими необходимые телеконсультации [4].

Сжатие и передача данных становятся все более важными в области компьютерной и сотовой связи. Эти методы, используемые, в медицинских кругах для обмена данными в больничных компьютерных сетях теперь основываются на передачи данных с сотового телефона пациента [5]. Приложения компьютерного моделирования служат возможными подходами к разработке удобных для оценки средств передачи медицинских данных с сотового телефона в реальном режиме времени.

При применении методов преобразования при сжатии данных и последующей передаче, требуется эффективная аппроксимация исходного сигнала с использованием меньшего количества коэффициентов преобразования.

Существует алгоритм сжатия и передачи данных в реальном времени между электронными медицинскими терминалами для периодического ЭКГ-сигнала, разработанный Санджун Ли, Чонгук Ким и Мен Ли, который состоит из пяти процедур сжатия и четырех процедур реконструкции. Алгоритм Санджун Ли, Чонгук Ким и Мен Ли продемонстрировал значительно лучшую производительность по сравнению с уровнями производительности других алгоритмов, но он имеет достаточно большее количество шагов сжатия и реконструкции по сравнению с предложенным алгоритмом в данной работе.

Результаты

Схема передачи данных ЭКГ с помощью телемедицинских систем и технологий в режиме реального времени показана на рисунке 1.

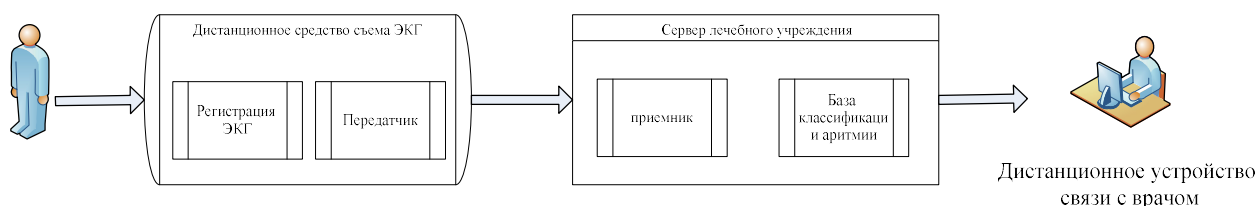


Рисунок 1 – Схема передачи данных ЭКГ с помощью телемедицинских систем и технологий

Основной проблемой передачи и приема данных является сжатие данных, которое направлено на уменьшение количества битов информации, необходимых для хранения или передачи оцифрованных сигналов ЭКГ без значительной потери качества сигнал [6] и реконструкции данных, которое направлено на максимальное восстановление данных.

На рисунке 2 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 по персонализированным данным в электронной карте пациента.

DWT использовался для линейного преобразования на этапе сжатия. Следовательно, дискретное преобразование дискретных вейвлетов используется в обратном процессе. Это значение рассчитывается для каждого цикла. Каждое преобразование зависит от выборки между двумя последовательными пиками. Результат обратного энтропийного кодирования делится на несколько циклов в зависимости от пиковых показателей, а выходной сигнал ЭКГ будет восстановлен с определенным допуском благодаря квантованию, используемому на этапе сжатия [7].

На этапе постобработки сигнал подается на образцы. Затем выходные данные выборки подаются на полосовой фильтр после остановки. Сгенерированный сигнал восстанавливает сигнал ЭКГ [8].

Предлагаемый алгоритм состоит, в основном, из этапа сжатия и этапа реконструирования: процесс сжатия (передатчик) и процесс реконструирования (приемник), как показано на рисунке 2.

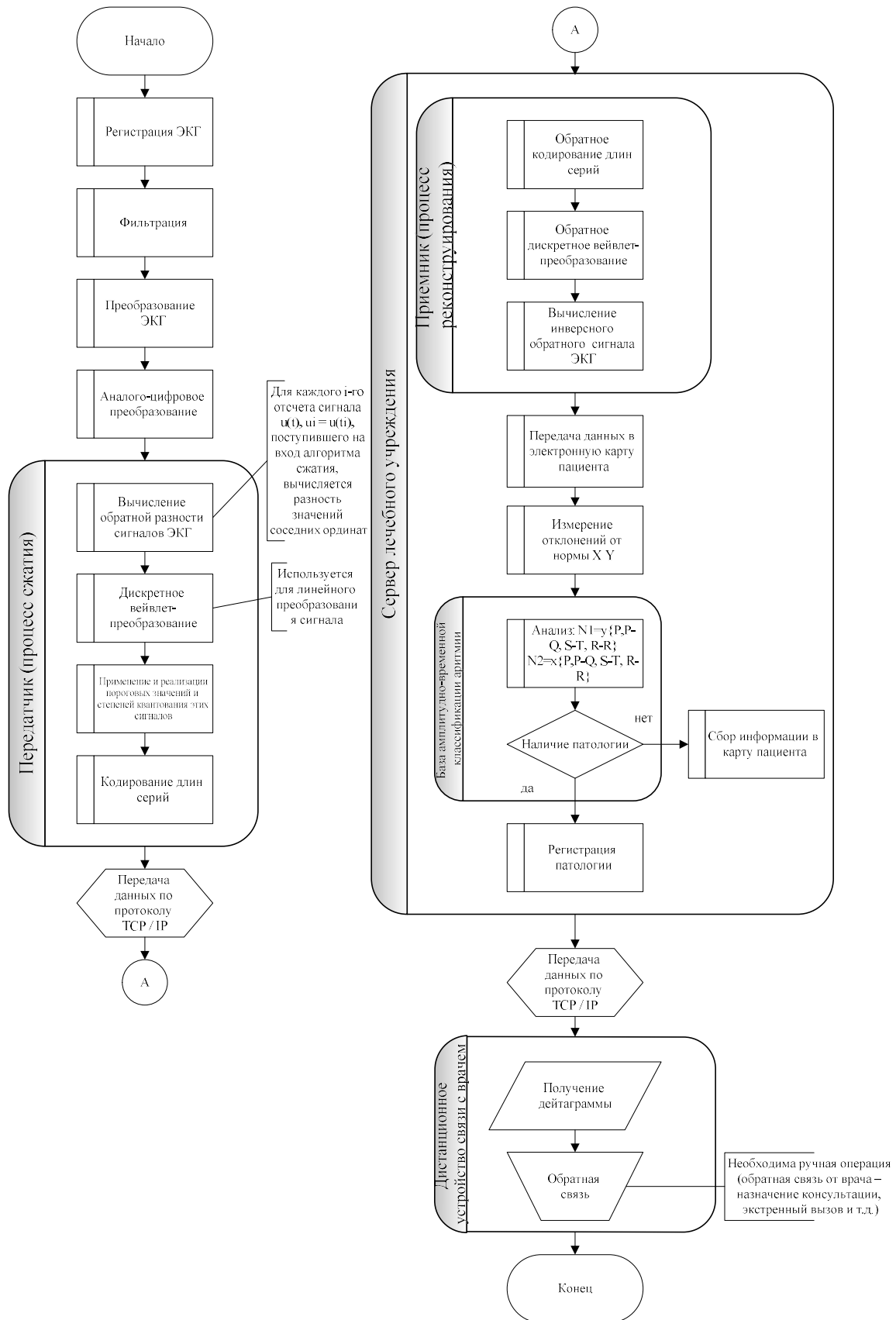


Рисунок 2 - Алгоритм сжатия и передачи данных ЭКГ аритмии

Процесс сжатия показывает сжатие данных сигнала ЭКГ, которое используется на стороне передатчика (пациента) с помощью телемедицины, так и процесс реконструирования - это декомпрессия данных сигнала ЭКГ на стороне приемника (специалисты) с помощью телемедицины [9].

Предварительная обработка должна начинаться с фильтрации сигнала ЭКГ для уменьшения мощности линии электропередачи помехи частотой 50 Гц, а затем применяется обратная разность сигнала для сигнала ЭКГ, которая сжимаются без потерь на 50%. После этого применяли DWT для данных сигнала ЭКГ после применения и реализации пороговых значений и степеней квантования этих сигналов [10].

Обсуждение

Современные медицинские информационные системы стремятся к моделям мониторинга в режиме реального времени, позволяющим оказывать помощь пациентам в любое время и в любом месте с помощью сигналов ЭКГ.

Однако существует ряд ограничений, таких как искажение данных и ограниченная полоса пропускания в беспроводной связи. Чтобы преодолеть такие ограничения, данное исследование фокусируется на сжатии и восстановлении сигнала ЭКГ.

Поэтому предложенному алгоритму сжатия и передачи данных ЭКГ аритмии в телемедицинских системах требуется апробация, которая позволит убедиться в правильности и надежности данного исследования.

В дальнейшем планируется оптимизировать алгоритм путем добавления блоков персонализированного мониторинга и постановки персонализированного диагноза.

Заключение

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.

Для алгоритма использовалась система 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 лечебного профилактического учреждения.

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., Дехов 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 (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-telemeditinskikh-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 Adrug, 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/ijgcd.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 (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, IJARCCCE. – 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

© B.A. Гасанова, А.В. Пушкарева, 2024

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.

Введение

Сердечно-лёгочная реанимация (СЛР) – это комплекс неотложных мероприятий, направленных на восстановление жизнедеятельности организма и выведение его из состояния клинической смерти. Она включает компрессии грудной клетки (непрямой массаж сердца) на глубину 3...6 см с частотой 100...120 нажатий в минуту и искусственную вентиляцию лёгких (искусственное дыхание). Соотношение компрессий и вдохов для взрослых должно быть тридцать к двум [1, 2]. Необходимо выбрать электрический привод, способный обеспечить необходимый цикл компрессии.

Основная часть

В работе [3] описано разработанное автором устройство, обеспечивающее цикл СЛР с электроприводом, состоящим из бесколлекторного двигателя постоянного тока с планетарным редуктором, разработан и испытан макетный образец такого устройства, приведенный на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид макетного устройства СЛР

В разработанном устройстве больше половины стоимости составляет двигатель с редуктором и силовым преобразователем. В работе [4] описано автоматическое устройство СЛР, в котором между двигателем и приводным барабаном установлена обгонная муфта свободного хода. Двигатель создает усилие сжатия при включенной муфте, а обратный ход осуществляется за счет упругости грудной клетки при выключенной муфте. В качестве двигателя также используется бесколлекторный ДПТ. Принцип включения двигателя только в одну сторону очень важен при использовании коллекторного ДПТ, поскольку позволяет уменьшить искрение на коллекторе.

На рисунке 2 представлена схема реаниматора.

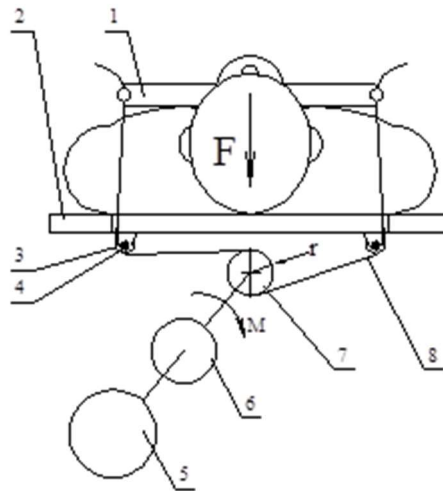


Рисунок 2 – Схема реаниматора:

1 – грудной прижим, 2 – основание (спинальный щит), 3 – опорный ролик, 4 – кронштейн, 5 – двигатель постоянного тока, 6 – обгонная муфта, 7 – натяжной барабан, 8 – ремень

Расчетная схема для моделирования процесса циклического нагружения грудной клетки показана на рисунке 3.

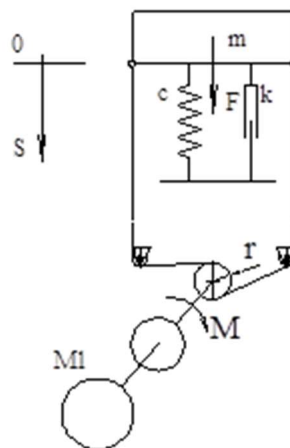


Рисунок 3 – Расчетная схема:

m – приведенная масса, F – усилие сжатия, c – жесткость, k – коэффициент демпфирования, S – деформация грудной клетки

При этом усилие сжатия определяется по формуле

$$F = \frac{M}{r}, \quad (1)$$

где M – момент двигателя,
 r – радиус барабана.

Момент двигателя постоянного тока описывается выражением

$$M = cI_{я}, \quad (2)$$

где $c = \frac{U_n - I_{ян} R_{я}}{\omega_n}$ – коэффициент пропорциональности,

U_n – номинальное напряжение двигателя,

$I_{ян}$ – номинальный ток,

$R_{я}$ – сопротивление якорной цепи. Ток якоря можно определить из дифференциального уравнения

$$U = E + I_{я}R_{я} + L_{я} \frac{dI_{я}}{dt}, \quad (3)$$

где U – напряжение, прикладываемое к якорной цепи,

$I_{я}$ – ток якоря,

$L_{я}$ – индуктивность якорной цепи.

Уравнения решались для двигателя постоянного тока с номинальной мощностью 170 Вт, при нулевых начальных условиях и следующих исходных данных: $m = 5 \text{ кг}$; $c = 10000 \text{ Н/м}$; $k = 500 \text{ Нс/м}$.

Результаты моделирования представлены на рисунках 4...6.

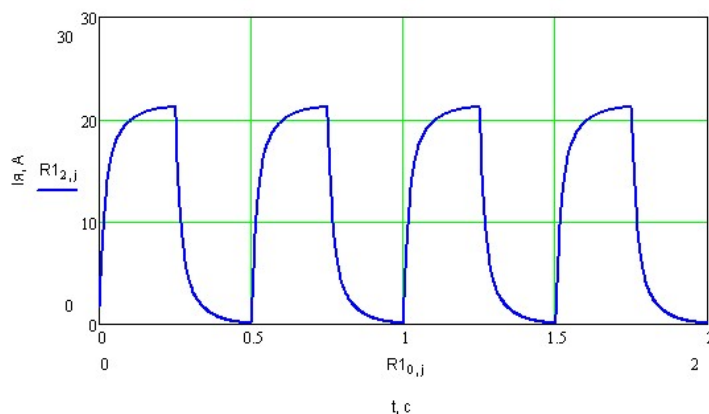


Рисунок 4 – График зависимости тока якоря от времени

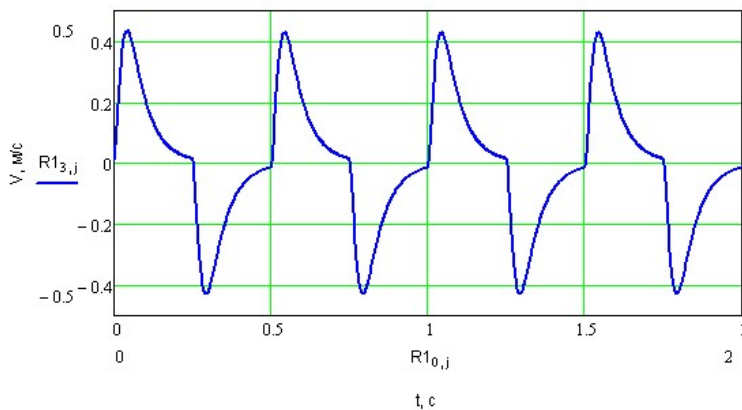


Рисунок 5 – График зависимости скорости прижима от времени

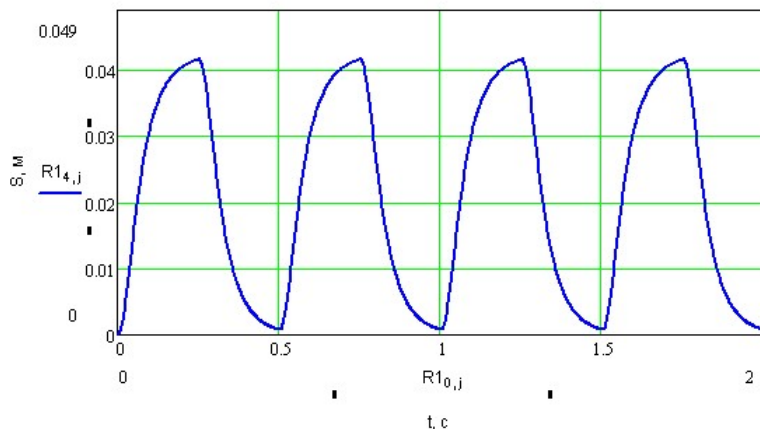


Рисунок 6 – График зависимости деформации грудной клетки от времени

При изменении напряжения, приложенного к якорной цепи, деформация грудной клетки изменяется. График зависимости величины деформации от напряжения приведен на рисунке 7.



Рисунок 7 – График зависимости деформации грудной клетки от напряжения на якорной цепи

С точки зрения теории оптимального управления задачу сжатия грудной клетки на одном цикле можно сформулировать следующим образом: необходимо найти такой управляющий момент M на валу двигателя, при котором достигается заданный угол поворота натяжного барабана $J_1^* = \int_0^T \omega dt = \varphi_0$ и обеспечивается минимум нормы мощности

управления $J_2^* = \int_0^T M^2 dt = \min$. Задача сводится к поиску экстремума функционала

$$I = \int_0^T \left\{ \omega + \lambda \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_c + k\omega^2 \right) \right\} dt. \quad (4)$$

Уравнение Эйлера

$$1 + 2\lambda k \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_c + k\omega \right) - 2\lambda J \left(J \frac{d^2\omega}{dt^2} + k \frac{d\omega}{dt} \right) = 0.$$

Это уравнение после преобразований уравнение сводится к

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} - k^2 = B, \quad (5)$$

где $B = 1/2\lambda J^2 + kM_c/J^2$, $k^2 = k_1^2/J^2$.

Для определения величины B , в которую входит λ , используется ограничение на перемещение, а затем управление M находится после подстановки $\omega(t)$ в дифференциальное уравнение движения.

Заключение

Разработанная модель доказывает возможность использования классических коллекторных двигателей постоянного тока без редукторов в качестве привода устройства сердечно-легочной реанимации и определять оптимальные управления. Величину деформации в необходимых пределах можно регулировать за счет изменения напряжения, прикладываемого к якорной цепи.

Одним из вопросов использования ДПТ в СЛР являются тепловые процессы, так как пиковый ток якорной цепи превышает номинальное значение в 5...6 раз. Эта сложность может быть решена с учетом кратковременной работы устройства (10...15 минут) за счет принудительного внешнего обдува.

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 deformatsii 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

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. Особенностям проектирования и изготовления инновационных сферических оболочек для глубоководных исследований посвящена эта работа.

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

Введение

Развитие технологий жидкостного дыхания и технических средств обеспечения этих процессов, наряду с появлением новых образцов дыхательных жидкостей, обладающих гораздо более низким уровнем токсичности и свойствами щадящего преодоления альвеолярно – капиллярного барьера существенно расширяют возможности и области применения систем жизнеобеспечения биологических объектов. В испытаниях вариантов аппаратов жидкостного дыхания, на разных этапах, были использованы такие дыхательные жидкости, как перфторан, перфторуглерод, перфтордекалин, карбогал и перфлуброн [1,2].

Основная часть

Вышеупомянутые дыхательные жидкости обладают разными химическими и физико – механическими свойствами, вязкостью, уровнем поверхностного натяжения и существенно отличающимися диапазонами растворимости газов (в частности – кислорода). Всё это вызывает необходимость существенного увеличения объёмов экспериментальных исследований для чего необходимо предварительно спроектировать и изготовить элементы глубоководного оборудования минимальной массы для включения в компоновочную схему аппаратов жидкостного дыхания замкнутого цикла с модулями оксигенации и десатурации. Предполагается исследовать новый вариант дыхательной жидкости включающий в свой состав молекулы немодифицированного углерода (фуллерена C₆₀). Для контроля и управления тонкими процессами, требующими оперативного воздействия на систему, в её структуру были включены следующие элементы приборно – аппаратурного регистрирующего комплекса:

1. Преобразователь дифференциального давления модели KELLER (серия PRD-33X).
2. Высокоточный преобразователь давления модели KELLER (серия PRD-35X).
3. Тестовый неонатальный имитатор лёгкого, модель «TL 2 PRO».
4. Портативное высокоточное тестовое лёгкое модели ACCU LUNG.
5. Гидроаккумулятор специальный со сменной эластичной мембраной модели «Джилекс – СН – 24».
6. Эластичные компенсирующие ёмкости моделей «Пакет», «Гармошка», «Подушка».
7. Безлатексный резервный эластичный мешок для аппарата жидкостного дыхания.
8. Расходомер модели GHM LABO – HD1K – 1 – P – S – 01SGK – 030.
9. Датчик расхода жидкости с цифровой индикацией модели PF 3W540 – F04 – 2N.
10. Микропроцессор XEMICS с интегрированным конвертером.
11. Высокоточный датчик температуры модели BAUMER TER8 – П30.2001. 0A03. 0A10.0000.
12. Ультразвуковой датчик расстояния модели PepperL+Fuchs UB200 – 12GM – I – V1.
13. Насос специальный модели DP – 35.
14. Водяной бесколлекторный насос модели IT – 750D5 – 24.
15. Помпа подъёмная Jebao DCP – 2500.

16. Бесщёточный магнитный насос для горячей жидкости модели ZC – T40.
17. Глушитель модели «FESTO UC – M5».
18. Аэратор специальный керамический – RDK – А.
19. Пневмоглушитель модели PSU – 15.
20. Глушитель модели WABCO Silencer.
21. Модуль глубоководный сферический для размещения узлов, датчиков и элементов

аппарата жидкостного дыхания замкнутого цикла.

Фуллерен C_{60} – наряду с алмазом и графитом является аллотропной формой углерода. Вещество отличается крайне низкой токсичностью. Для использования фуллерена C_{60} в инновационных медицинских исследованиях, интерес могут представлять следующие его свойства:

- защита от радиации и светового излучения;
- бактериально – вирусная защита;
- гипоаллергенные качества;
- стимуляция иммунитета (иммунных реакций);
- подавление онкологических (раковых) клеток;
- антиоксидантные качества;
- защита мозговых структур;
- стимулирование регенерации нервных окончаний;
- регенераций мягких тканей организма;
- способность доставлять в клеточные структуры фармпрепараты;
- рост продолжительности жизни биообъектов;
- синтез ретиноидов и регуляция эмбриогенеза;

Эксперименты с фуллереном C_{60} требуют тщательной проверки, контроля и статистики, поскольку механизмы взаимодействия фуллерена с клетками не ясны и пока глубоко не изучены. Химически чистые растворы фуллерена имеют бледно – розовый оттенок и обходятся в производстве в 20 долларов за грамм. Существенный интерес представляет изучение многочисленных водорастворимых растворов фуллерена C_{60} синтезированных в Российской Федерации за последние 5 ÷ 6 лет [3,4]. Следует заметить, что любые экспериментальные исследования конструкций, процессов и технологий должны завершаться формулировкой выводов и выдачей практических рекомендаций. Анализ наблюдений, систематизация и обобщение экспериментальных данных является важнейшей и ответственной частью научных исследований.

При выполнении разнообразных программ глубоководных исследований необходимо надёжно защищать дорогостоящее или уникальное оборудование от внешнего давления. Как показывает практика, с решением этой задачи надёжно справляются сферические оболочки, которые спроектированы с необходимым запасом прочности и устойчивы к циклическим, знакопеременным рабочим нагрузкам [5 ÷ 9] (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид глубоководного сферического модуля Ø 310 мм

Обычно, потеря устойчивости сферических оболочек под высоким внешним воздействием происходит хлопком, после образования группы волн несимметричной формы, которые трансформируются в одну глубокую вмятину [10,15]. Величина критического давления для идеальных оболочек имеет вид:

$$P_{кр} = 1,21 \frac{E\delta^2}{R^2}. \quad (1)$$

Однако, расчётная величина такого давления значительно превышает экспериментально полученные величины. Многократные эксперименты, выполненные в морских условиях на глубинах от 1500 до 2000 метров показывают, что системная величина эмпирического коэффициента находится в пределах 0,2 ... 0,3. Достоверно установлено, что критическое давление существенно зависит от несовершенств формы сферы, и с их увеличением заметно уменьшается. К таким «несовершенствам» относятся: резьбовые отверстия, коуши, лючки, фитинги, такелажные приливы, разнотолщинность, выборки, рёбра жёсткости и т.д. Если эти отклонения от идеальной сферы равняются толщине оболочки или превышают её, то величины критического давления снижаются ещё в 1,5 ÷ 2,0 раза [12 ÷ 14].

Известно, что в основе различных конструкций сосудов давления лежат разнообразные оболочки. При проектировании и расчёте оболочек для сосудов, работающих на больших глубинах могут быть использованы математические зависимости безмоментных теорий. Обычно расчёты сводятся к определению предельных внешних или внутренних усилий и прогнозной оценке запаса прочности. Актуальными являются проблемы проектирования оболочек минимальной массы. В процессе проектирования и конструирования глубоководных сферических оболочек возникла необходимость решения нескольких специфических задач к которым относятся следующие варианты расчётов:

- сферическая оболочка под действием радиальных сил;
- сферическая оболочка под действием касательных сил;
- сферическая оболочка под действием моментов;
- сферическая оболочка под действием следящих нагрузок;
- сферическая оболочка и потеря устойчивости.

На итоговые значения показателей устойчивости сферических глубоководных оболочек существенное влияние оказывают:

- отклонения от теоретического контура;
- остаточные сварочные напряжения;
- негативные технологические факторы;
- предел текучести материала сферы;
- адекватность силовой схемы нагружения.

В задаче нагружения сферической оболочки внешним распределенным давлением необходимо определять величину критического давления и потери устойчивости. Эти величины могут быть найдены в следующем виде:

$$G_{кр} = k \frac{E\delta}{ZR^2}, \quad P_{кр} = k \frac{E\delta^2}{R^2}. \quad (2)$$

Для наших конкретных условий эксплуатации глубоководного аппарата жидкостного дыхания коэффициент $k = 0.3$. Принимая коэффициент безопасности изделия $f = P_{кр}$ можно определить толщину стенки оболочки как [15]:

$$\delta = \left(\frac{P_{кр} R^2 \sqrt[3]{R^3}}{2,38cE} \right)^{0,42}, \quad (3)$$

где $C = 1$ для качественно изготовленных, идеальных оболочек и $C = 0,5$, если, несовершенства формы превышают толщину стенки оболочки.

Для окончательного определения толщины стенки оболочки, определяем критические напряжения для сравнения их с пределом текучести конструкционного материала по выражению:

$$G_{кр} = \frac{P_{кр} R}{2\delta} \leq G_{т}. \quad (4)$$

Следует заметить, что записанные выражения справедливы в диапазоне соотношения $R/\delta = 1,0 \div 3,3$.

При выполнении серии натурных экспериментов в морских условиях на Черном море у мыса Фиолент были выполнены работы по исследованию технологий жидкостного дыхания биологических объектов на режимах погружения – всплытия с фиксацией достижимых глубин в 500, 1000 и 1500 м [14,19].

Найдены варианты безопасных режимов жидкостного дыхания. Для этого была разработана и изготовлена глубоководная сферо – цилиндрическая капсула в сборе с лобовым и кормовым обтекателями. Определены оптимальные скорости погружения / всплытия. Получены достоверные результаты медицинских показателей биообъектов во время и после погружения. Применялись электрокардиограммы, электроэнцефалограммы, ультразвуковые, рентгеновские и специальные инструментальные виды исследований. Осуществлялись постоянная видеорегистрация хода экспериментов. Для экспериментальных исследований рабочих режимов использовалось специальное лабораторное и техническое оборудование (рисунок 2).

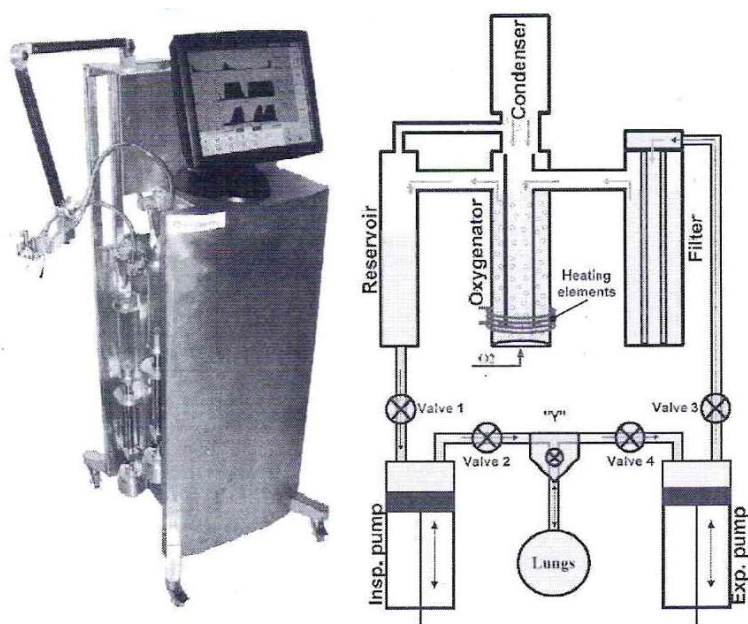


Рисунок 2 – Прототип лабораторной установки тотальной жидкостной искусственной вентиляции лёгких (ТЖИВЛ)

В результате выполненных за период с 2017 по 2022 г. лабораторных и морских натурных испытаний процессов жидкостного дыхания биологических объектов, сотрудниками лаборатории «Экспериментальные системы жизнеобеспечения биологических объектов» Севастопольского государственного университета получены итоговые данные параметров жизнедеятельности лабораторных животных при погружении / всплытии на глубины 500, 1000 и 1500 м. Экспериментально определены безопасные режимы погружения / всплытия для данных условий. Для реализации серии морских экспериментальных работ в области изучения процессов жидкостного дыхания была специально спроектирована и изготовлена автономная глубоководная капсула удобообтекаемой формы с низким лобовым сопротивлением потоку на основных скоростных режимах погружения / всплытия. Также была определена максимальная глубина погружения биообъекта при спонтанном дыхании. Получены, зафиксированы и систематизированы результаты медицинских исследований биообъектов до, после и во время погружения на рабочие глубины. При исследованиях также были использованы электрокардиограммы, электроэнцефалограммы, ультразвуковые, рентгеновские и иные специальные инструментальные варианты обследования биообъектов. Велась постоянная видеорегистрация и хронометраж хода работ в эксперименте.

По анализу результатов экспериментальных исследований были обосновано приняты следующие параметры тотальной жидкостной искусственной вентиляции лёгких (ТЖИВЛ):

- частота дыхания биообъекта $3 \div 8$ вдохов / выдохов в 1 минуту;
- дыхательный объём: 15 мл на 1 кг массы тела биообъекта;
- соотношение вдох / выдох: от 1/2 до 1/3.

Заключение.

В ходе подготовки к очередному плановому этапу натуральных морских глубоководных исследований технологий жидкостного дыхания биологических объектов, были спроектированы, сконструированы и изготовлены узлы и элементы технических средств обеспечения этих работ. К вышеупомянутым средствам относится глубоководный аппарат жидкостного дыхания замкнутого цикла, в который входят модули оксигенации, десатурации растворённых газов, и глубоководные высокоточные датчики температуры, давления, расхода, перемещения и т.д.

Дополнительно были также изготовлены сферические титановые корпуса – оболочки минимальной массы. В качестве конструкционного материала для них применялись титановые сплавы марок ВТ 1–2 и ТГТВ. Специально изготовленная удобообтекаемая глубоководная капсула была оснащена подвижным кольцевым обтекателем «волосяного» типа снижающим коэффициент лобового сопротивления до минимального уровня для заданных значений скоростей и глубин. В итоге, разработанный и изготовленный комплект технического оснащения глубоководных работ, позволил успешно провести серию экспериментов по изучению медико – биологических, технических и иных особенностей реализации процессов жидкостного дыхания биологических объектов и, в последствии, человека на глубинах более 1000 м [19 ÷ 21].

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. Баладюк // Биомедицинский журнал, 2004. – Т.5 – С. 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. 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 C₆₀ // 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 сифонный 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 A61M 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 A61N 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. – T.5 – S. 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. Degraeuwe P.L. Effect of perfluorochemical liquid ventilation cardiac output and blood pressure variability in neonatal piglets with respiratory insufficiency / P.L. Degraeuwe, 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 nirvaniya / 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 nirvaniya/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 pokritiya na osnove fullerene C₆₀ // Materiali MNTK «Tribologiya i tribotekhnika», - Sydak, 2003. – S. 720 – 721.
17. Gaynullina Ya.N. Obosnovanie primeneniya spetsialnih glybokovodnikh 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. Kotsentratsiya 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 ustanovok zhidkostnogo dikhaniya / Pashkov E.V., Maistrishin M.M., Kalinin M.I., Polivtsev V.V.; zayavitel i patentoobladatel Fond perspektivnikh issledovaniy. – № RU2020129068U; zayavl. 02.09.2020; opubl. 30.12.2021. biul. № 1.
20. Pat.202283 Rossiyskaya federatsiya, MPK A61M 16/00. Ustanovka dlya zhidkostnogo dikhaniya v usloviyakh giperbarii / Pashkov E.V., Polivtsev V.P., Kalinin M.I., Polivtsev V.V.; zayavitel i patentoobladatel Fond perspektivnikh 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 perspektivnikh 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

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.

Введение

Тромбоз – это образование тромба внутри кровеносных сосудов, как венозных, так и артериальных, что ограничивает естественный поток крови и приводит к клиническим последствиям [1]. Способность крови свободно течь в сосудах зависит от сложного гомеостаза, который существует между клетками крови, при наличии дисбаланса в этом физиологическом процессе может возникнуть повышенный риск развития тромбоза.

Частота возникновения тромбоза артерий взрослых составляет приблизительно один случай на тысячу в год. После 45 лет риск тромбоза значительно возрастает. Помимо возраста, основными факторами риска тромбоза являются экзогенные факторы, такие как хирургические операции, госпитализация, неподвижность, травма, беременность, послеродовой период и прием гормональных препаратов, а также эндогенные факторы, такие как рак, ожирение, а также наследственные и приобретенные нарушения свертываемости крови [2]. Он может возникнуть в любой системе органов, а его клиническая картина может варьировать в зависимости от сопутствующих заболеваний и наличия (или отсутствия) провоцирующих факторов. Учитывая вышеперечисленное, своевременное диагностирование тромбоза как венозного, так и артериального, с целью его дальнейшего лечения позволит улучшить качество жизни населения и уменьшить вероятность летальных случаев.

Для своевременной профилактики и диагностики тромбоза в настоящее время применяют в основном метод ультразвуковой доплерографии, который заключается в измерении скорости кровотока в исследуемых артериях [3; 4]. К достоинствам данного метода можно отнести измерение скорости кровотока в понятных медицинскому персоналу единицах – м/с. Основным недостатком метода является зависимость полученных результатов измерения от угла и места приложения ультразвукового датчика к исследуемому объекту, а также высокая чувствительность метода к различным вибрациям (например, дыханию), которые приводят к изменению положения датчика и, соответственно, неточностям измерения скорости кровотока. Также в ряде случаев, с учетом данного недостатка применение ультразвукового метода выглядит затруднительным, особенно для внедрения его в портативные персональные устройства, осуществляющие мониторинг скорости кровотока. Таким образом, применение ультразвукового метода для длительного мониторинга или же при некоторой активности человека сопровождается большими погрешностями результата. Вследствие чего предлагается рассмотреть альтернативные методы, позволяющие решать проблему своевременной диагностики и профилактики тромбоза.

Таким альтернативным решением для мониторинга скорости кровотока является применение электроплетизмографического метода, основанного на измерении импеданса исследуемого участка тела путем воздействия на него переменным током высокой частоты [5]. Несмотря на то, что приложение электродов к поверхности кожи также делает данный метод чувствительным к различным механическим вибрациям, его принцип действия нивелирует данный недостаток за счет различных вариантов конструктивных особенностей электродов. В результате чего погрешность результатов может быть снижена за счет исключения влияния

точного места и угла приложения к объекту исследования. К недостаткам данного метода можно отнести то, что полученная при его реализации реограмма, в частности дифференциальная реограмма, представляет собой зависимость изменения импеданса (Ом) от времени (с), что затрудняет понимание физических процессов, которые происходят в кровеносном русле. Несмотря на это проблему своевременной диагностики и профилактики тромбоза можно решать электроплетизмографическим методом, внося ряд практических решений, которые будут нацелены на более простую интерпретацию результатов измерения скорости кровотока, выраженной в международной системе единиц. Для этого предлагается осуществить переход от результатов, получаемых в единицах Ом/с, в результаты с размерностью м/с.

Похожие исследования уже проводились в работе [6], где оценивалась корреляция импеданса и скорости кровотока, которая составила 0,65. Однако, данные исследования проводились в области лучезапястья, что не позволяет применять полученные результаты для мониторинга магистральных сосудов, ведущих к головному мозгу, что могло бы позволить диагностировать и предотвращать нарушения кровообращения головного мозга, именуемые инсультом.

Цель данного исследования заключается в поиске закономерностей в области левой общей сонной артерии между ультразвуковым и электроплетизмографическим методами, позволяющих оценивать скорость кровотока методом электроплетизмографии в единицах м/с.

2 Теоретические предпосылки взаимосвязи результатов измерения импеданса электроплетизмографическим методом и скорости кровотока ультразвуковым методом

В виде фундамента проведения исследований авторами заложена взаимосвязь между измерением импеданса электроплетизмографическим методом и скоростью кровотока ультразвуковым методом.

Так, согласно [7] скорость кровотока выражается формулой:

$$v = \frac{c \cdot f_{Doppler}}{2 \cdot f_0} \cdot \cos(\theta), \quad (1)$$

где v — скорость кровотока;

c — скорость распространения звука;

$f_{Doppler}$ — частота сдвига, возникающая при эффекте Доплера;

f_0 — частота, излучаемая датчиком;

θ — угол падения волны на отражающую поверхность.

В свою очередь, скорость распространения звука в жидкостях равна [7]:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta \cdot \rho}}, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости;

$\beta = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P}$ — коэффициент адиабатической сжимаемости;

V — объем;

ΔV — изменение объема;

ΔP — изменение давления.

Анализируя приведенные формулы, можно сделать вывод о том, что скорость кровотока будет зависеть от плотности крови и приращения объема кровотока.

Также согласно [7] плотность жидкости и скорость распространения звука формируют акустическое сопротивление среды, выражающееся в $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$.

При применении электроплетизмографии изменение объема выражается [5]:

$$\Delta V = -\frac{\rho_{yo} \cdot l^2}{Z^2} \cdot \Delta Z, \quad (3)$$

где ρ_{yo} — удельное электрическое сопротивление тканей;

l — длина исследуемого участка;

Z — полное начальное электрическое сопротивление участка.

Из выражения (3) описывают зависимость объемной скорости кровотока Q [5]:

$$Q = -\frac{\rho_{уд} \cdot l^2}{Z^2} \cdot \frac{dZ}{dt}, \quad (4)$$



где $\frac{dZ}{dt}$ — скорость изменения полного импеданса.

Анализируя формулы (1) – (4) можно сделать вывод о том, что при измерении объемной и линейной скорости кровотока разными методами основным влияющим физическим параметром является объем, а точнее его приращение, которое оказывает влияние на акустический импеданс и удельное сопротивление тканей. Таким образом, при синхронизированном измерении скорости кровотока и импеданса ткани должна наблюдаться определенная закономерность.

3 Оборудование и методика проведения экспериментов

Для проведения экспериментальных исследований использовалось оборудование научно-образовательного центра «Инновационные технические решения в области медицины», приведенное в таблице 1.

Таблица 1 – Оборудование, участвующее в исследовании

Название	Характеристики/функции	Назначение
<p>СОНОМЕД 300М</p> 	<p>Датчик с частотой: 2 МГц Расчет систолической и диастолической скорости кровотока</p>	<p>Измерение скорости кровотока методом ультразвуковой доплерографии</p>
<p>РЕО-СПЕКТР-2</p> 	<p>Частота дискретизации: 500 Гц Частота переменного тока: 50 кГц Биполярное отведение для измерения сигнала</p>	<p>Измерение импеданса исследуемого участка за счет воздействия переменного тока</p>

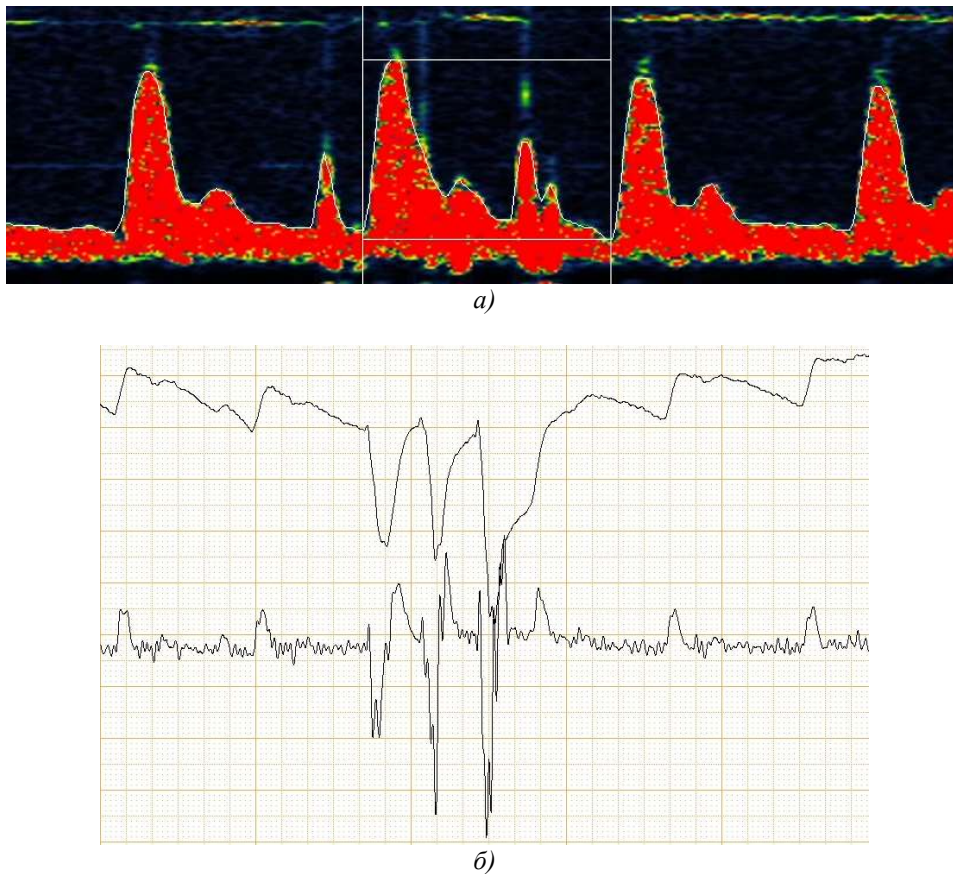
Методика проведения экспериментальных исследований базировалась на следующих положениях.

1. Для измерения скорости кровотока ультразвуковой датчик (УЗ) размещался в области общей сонной артерии.

2. Для измерения импеданса применялся электрод для регистрации реокардиографии по Кубичеку (рулетка «шейная»), входящий в комплектацию прибора Рео-Спектр, в области шеи ниже кадыка. Расстояние между электродами 10 мм.

3. Синхронизация измерений проводилась по 3-м стукам с одновременной записью результатов с помощью специализированных программ для захвата видео с мониторов. Длительность одного исследования составляла 2 минуты, что соответствовало приблизительно 150 кардиоциклам. На рисунке 1 представлены примеры доплерограммы (а), а также реограммы и дифференциальной реограммы (б), полученные во время исследований.

4. Добровольцем выступал здоровый молодой человек в возрасте 22 лет без хронических и острых заболеваний сердечно-сосудистой системы.



*Рисунок 1 – Пример исследования с синхронизацией сигналов
а – доплерограмма; б – реограмма и дифференциальная реограмма*

4 Результаты

При проведении поиска закономерностей между ультразвуковым и электроплетизмографическим методами рассматривалась дифференциальная реограмма, пример первых кардиоциклов которой, представлен на рисунке 2. В дифференциальной реограмме учитывались только систолические пики, соответствующие выбросу крови сердца, которые впоследствии сравнивались со систолической скоростью кровотока доплерограммы, пример которой изображен на рисунке 3.

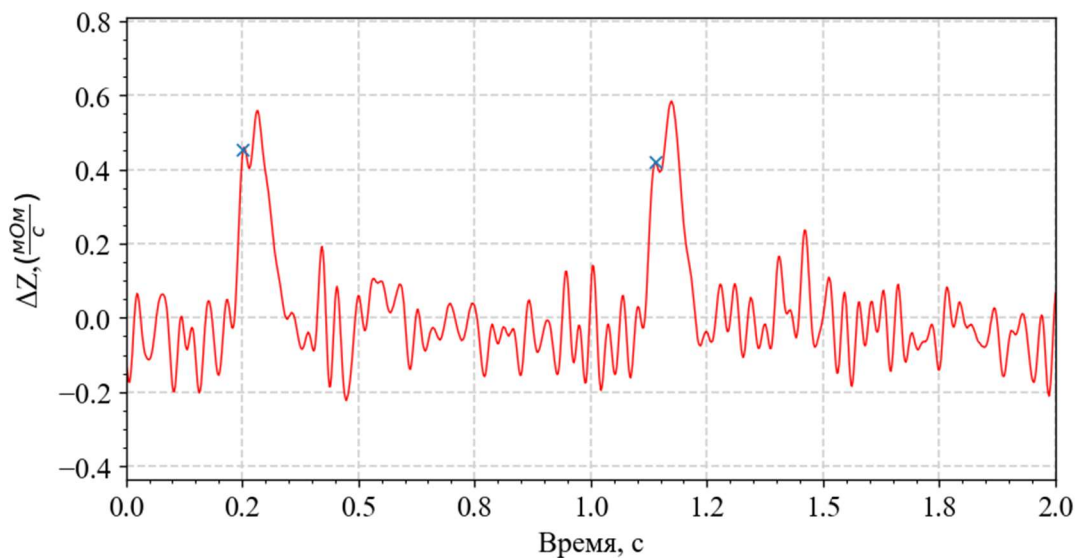


Рисунок 2 – Выборка дифференциальной реограммы в начале эксперимента

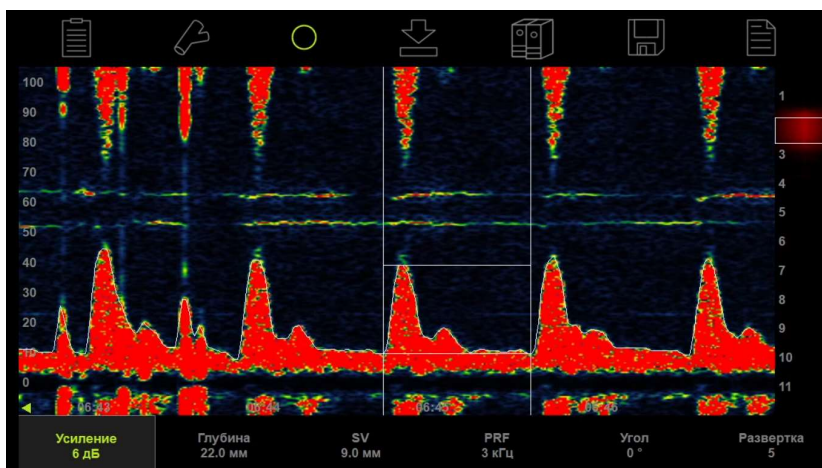


Рисунок 3 – Выборка доплерограммы в начале исследования

На основании систолических пиков были рассчитаны значения эмпирического коэффициента μ для каждого пика, соответствующие отношению изменения импеданса тканей, выраженного мОм/с, к линейной скорости кровотока, выраженной в м/с (рисунок 4).

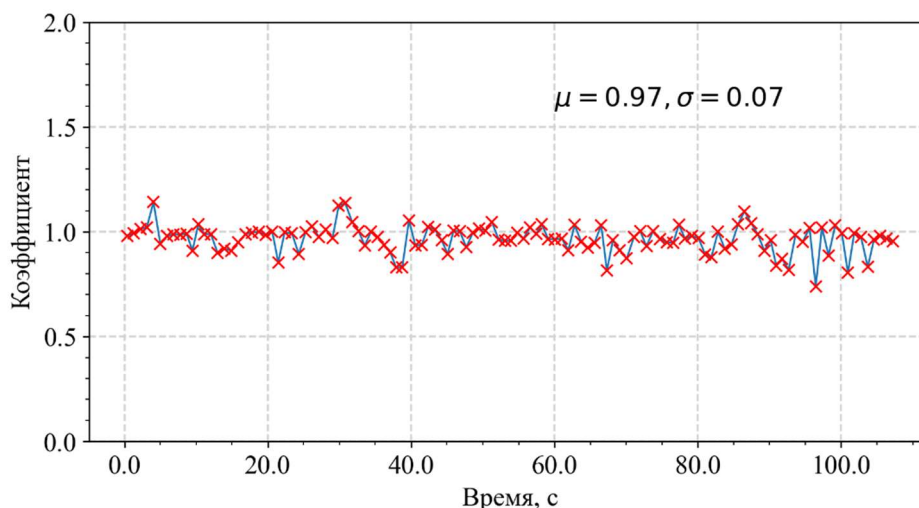


Рисунок 4 – Отношение систолической скорости, измеренной УЗ методом, к систолической скорости, измеренной электроплетизмографическим методом

Полученные результаты показывают, что указанный коэффициент случайно колеблется относительно некоторого среднего значения $\mu = 0.97$, которое практически не изменяется с течением времени эксперимента. При этом значение среднеквадратического отклонения (СКО) этих флуктуаций $\sigma = 0.07$, что составляет порядка 8 % от среднего значения. Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности оценки линейной скорости кровотока, выраженной в м/с по измеренному значению изменения импеданса тканей, выраженной в мОм/с, с использованием найденного эмпирического коэффициента μ . Полученное же относительно высокое значение σ вызвано, на наш взгляд, указанными выше недостатками ультразвукового метода, поскольку на доплерограмму влияет ряд факторов, среди которых, в частности, нестабильность угла позиционирования ультразвукового датчика, а также несовершенство заложенного в программу алгоритма расчета систолического пика кровотока (происходит некоторый «срез» пика кардиоцикла) (рисунок 5).

Вероятная коррекция данных параметров позволит снизить СКО и получить более точную закономерность между исследуемыми параметрами.

Характер найденных значений эмпирического коэффициента (рисунок 3) позволяет выдвинуть гипотезу о наличии линейной регрессии между значениями изменения импеданса тканей и линейной скорости кровотока. Характер расположения экспериментальных значений

указанных параметров при из синхронном измерении (рисунок 6) подтверждает это предположение.

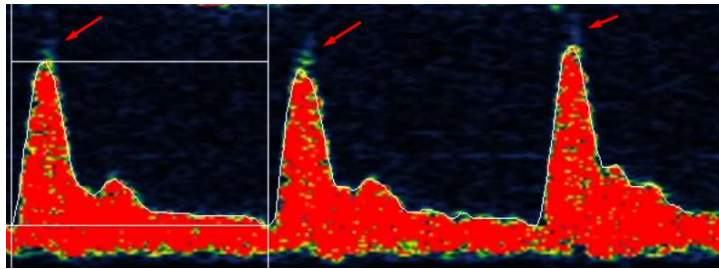


Рисунок 5 – Несовершенство алгоритма расчета систолического пика скорости кровотока в результате неточного позиционирования УЗ датчика

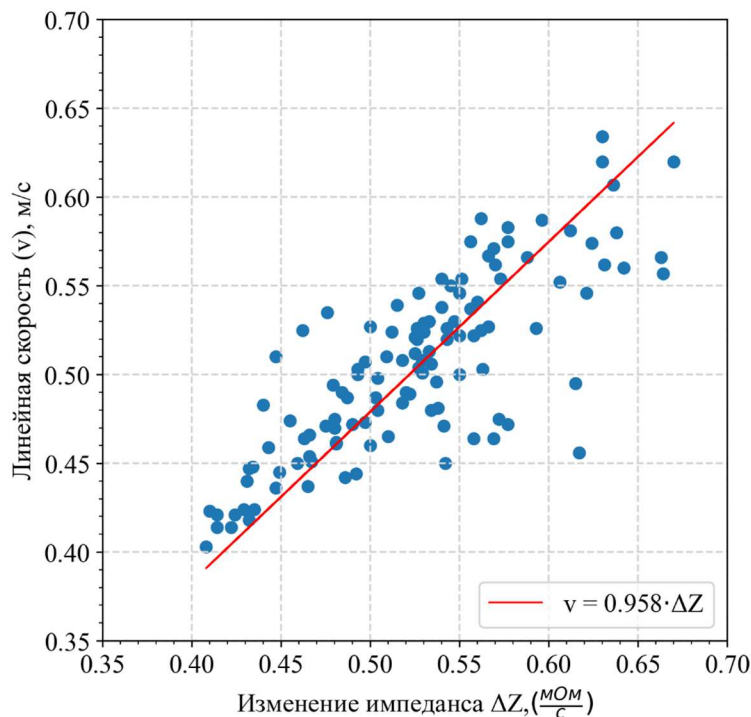


Рисунок 6 – График рассеяния линейной скорости кровотока УЗ методом от изменения импеданса тканей электроплетизмографическим методом

Полученное методом наименьших квадратов уравнение регрессии имеет коэффициент 0,96, что хорошо статистически соответствует найденному выше значению $\mu = 0.97$. При этом рассчитанное по представленным экспериментальным данным значение коэффициента корреляции Пирсона составило 0,79, что свидетельствует о высокой степени взаимосвязи между параметрами.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Теоретический анализ показывает, что значения систолической скорости кровотока, измеренные УЗ методом, и изменения импеданса исследуемого участка, измеренные электроплетизмографическим методом, определяются общим для них параметром - приращением объема кровенаполнения, что позволяет предполагать наличие корреляционной связи между указанными параметрами.

2. На основании исследований установлено, что эмпирический коэффициент, определяемый отношением систолической скорости, измеренной УЗ методом, к изменению импеданса исследуемого участка, измеренной электроплетизмографическим методом, случайно флуктуирует относительно некоторого среднего значения $\mu = 0.97$, которое

практически не изменяется с течением времени эксперимента, что позволяет предположить наличие линейной регрессии между указанными параметрами.

3. Рассчитанное значение СКО эмпирического коэффициента составляет порядка 8 % от среднего значения, что обусловлено недостатками ультразвукового метода, в частности, нестабильностью угла позиционирования ультразвукового датчика, а также несовершенством заложенного в программу алгоритма расчета систолического пика кровотока (происходит некоторый «срез» пика кардиоцикла).

4. Полученное методом наименьших квадратов уравнение линейной регрессии имеет значение эмпирического коэффициента 0,96, при этом рассчитанное значение коэффициента корреляции Пирсона составляет 0,79, что свидетельствует о высокой степени взаимосвязи между параметрами. Это позволяет считать предложенную модель приемлемой для того, чтобы переводить изменение импеданса тканей, измеренного электроплетизмографическим методом и выраженного мОм/с, в линейную скорость кровотока, выраженную в м/с.

5. Проведенные исследования являются оценочными, они подтверждают принципиальную возможность решения поставленной задачи и предполагают дальнейшее развитие. Эмпирический коэффициент не является абсолютным и может зависеть, очевидно, от расстояния между электродами, частоты воздействующего переменного тока и амплитуды переменного тока при использовании электроплетизмографического метода. Поэтому направления дальнейших работ заключаются в исследовании указанных зависимостей, а также уточнение значения эмпирического коэффициента для людей с разными физиологическими данными, которые могут влиять на проводимость тканей человека.

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: eipro@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.]. M.: FIZMATLIT, 2008. 544 p.
4. A.V. Kholin, E.V. Bondareva. Dopplerography and duplex scanning of blood vessels. M.: 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. M.: 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.

Введение

Сегодня перспективными элементами цифровой поддержки конструкторско-технологического проектирования на предприятиях радиоэлектронного приборостроения являются виртуальная (*Virtual Reality, VR*) и дополненная (*Augmented Reality, AR*) реальности, получившие немалое распространение в различных областях человеческой деятельности. Хотя применение этих технологий продвинулось первоначально в таких сферах как развлекательная индустрия, образование, медицина, сегодня VR/AR-технологии признаны эффективными и для визуализации данных, проектирования, реализации новых форм анализа промышленных продуктов [1, 2].

Под виртуальной реальностью понимают комплексные технологии, позволяющие генерировать с помощью компьютерных программных и технических средств трехмерную цифровую среду. VR позволяет имитировать воздействие цифрового мира на пользователя, отслеживая положение его тела в пространстве, а также стимулируя сходные с реальными ощущениями, полученными через органы зрения, слуха, осязания, реакции пользователя. Дополненная реальность – комплексная технология, позволяющая интегрировать в реальный мир информацию в форме текста, компьютерной графики, аудио и иных данных в режиме реального времени, направленная на расширение взаимодействия пользователя с окружающей средой и улучшение восприятия информации о ней. Дополненная реальность переносит цифровые модели на реальную среду.

Существует также смешанная реальность (*Mixed Reality, MR*), которая является разновидностью дополненной реальности. В MR можно видеть объемные 3D-объекты, которые имеют привязку к положению в реальном мире, то есть могут быть «прикреплены» к физическим объектам вокруг пользователя. Место каждой из этих технологий обозначено на рисунке 1.

Перспективной задачей развития дополненной реальности является состояние, при котором пользователь видит мир вокруг себя в полной мере (*Completely Real*) и может вызвать необходимую ему цифровую информацию о реальном мире. Если представить шкалу, измеряющую степень погружения пользователя в цифровую среду, VR окажется крайней левой точкой, а AR – крайней правой.

Применение инструментов визуализации виртуальной реальности при конструкторском проектировании и освоении новых изделий на приборостроительном

предприятию, когда требуется разработка опытного образца прибора для тестирования и прохождения испытаний, способно упростить эти задачи, имитируя свойства и поведение образца на различных стадиях его разработки в цифровой среде. Цифровые двойники позволяют снизить затраты на создание реальных образцов и проведение испытаний, сократить время на отработку прибора на стадиях эскизного и технического проектов.

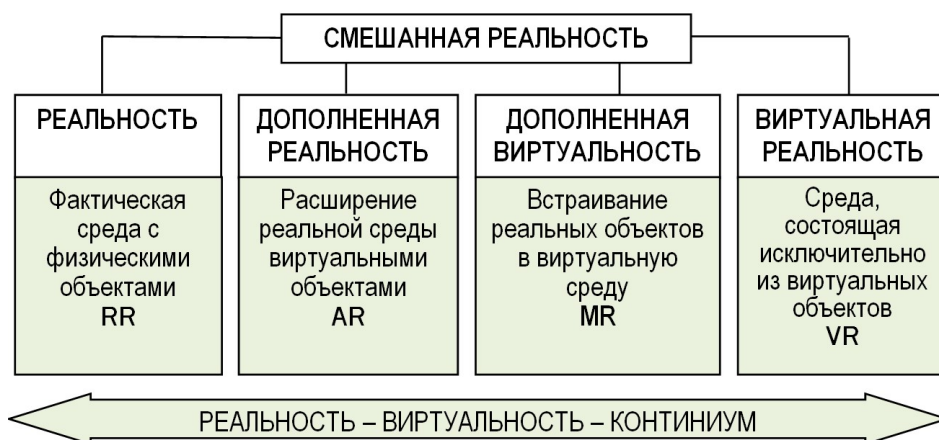


Рисунок 1 – Реальность – виртуальность – континуум согласно [3]

В случае проектирования прибора переход со стадии проектной документации к рабочей требует достаточно длительной процедуры согласования чертежей и документации, прохождения ими экспертизы. Трудоемкость этого процесса значительна из-за необходимости устранения ошибок, допущенных при проектировании, учета пожеланий заказчика. Это занимает достаточно много временных и интеллектуальных затрат инженеров-проектировщиков. В данном случае применение визуализации в виртуальной реальности позволяет упростить процедуру нахождения и устранения допущенных при проектировании ошибок, внесения инженерных изменений и сократить трудоемкость процесса перехода от проектной документации к рабочей.

При этом применение *VR/AR*-технологий внутри цифровой среды виртуальной реальности, где любые изменения характеристик проектируемого прибора приведут к изменениям в его проектной документации, реализует принцип информационного моделирования *BIM (Building Information Modeling)*, суть которого заключается в том, что все работы по проектированию должны быть выполнены в пространстве единой информационной модели. В виртуальной реальности появляется возможность отработать все нюансы сборки и разборки изделия на стадии проектирования. Способность оценить будущее изделие максимально приближенно к реальным условиям, предоставляемая виртуальной реальностью, повышает не только качество продукта, но и уровень безопасности производственных процессов.

В последнее время в радиоэлектронном приборостроении удастся обеспечить высокую эффективность за счет использования искусственного интеллекта, машинного обучения и киберфизических систем, облачных вычислений и передачи больших данных, аддитивных технологий, формирования сетевого взаимодействия партнеров, Интернета вещей и внедрения цифровых бизнес-моделей [4]. Также стоит отметить, что в связи с цифровизацией производственной среды, развитием концепции Индустрия 4.0 в радиоэлектронном приборостроении, внедрением умного оборудования, востребованными становятся технологии цифровых двойников (*Digital Twin*).

Технологии виртуальной и дополненной реальности должны стать частью единой информационной среды, содержащей распределенные базы данных об изделиях (включая чертежи, типовые проекты, модели, расчеты, данные по испытаниям и т.д.), производственной среде, ресурсах, бизнес-процессах. Технологии виртуальной и дополненной реальности могли бы стать в этом случае инструментом, который бы улучшил качество взаимодействия внутри такой информационной среды.

Анализ процессов управления инженерными изменениями в изделиях радиоэлектронного приборостроения

Рассматриваемые в научных исследованиях подходы к поддержке проведения изменений в производственных системах в основном описывают методологии планирования производства на основе *AR/VR*-технологий. Часто эти технологии рассматриваются применительно к процессам проектирования производственных систем, компоновки их элементов, замены производственных линий, оборудования, внесению изменений в технологические планировки [7, 8]. В работах [9, 10, 11, 12] исследуются вопросы планирования изменений компоновки производственных систем, их реконфигурации, взаимодействия рабочих мест с помощью виртуальной реальности, удаленного взаимодействия и коллективной работы с применением аппаратного обеспечения *AR/VR*. В других работах обосновывается применение *AR/VR* для моделирования технологических процессов [13, 14], виртуальной сборки новых компонентов [15, 16], поддержки процессов технического обслуживания и ремонта изделий [17, 18, 19, 20, 21].

Обращает внимание, что все выше обозначенные производственные изменения происходят в начале производственного цикла и могут быть запланированы. Инженерные изменения в конструкции и технологии приборов могут возникать непредсказуемо на разных этапах жизненного цикла, причем их количество существенно. Обработка и внедрение этих изменений должно происходить параллельно с этапами проектирования, освоения, производства и эксплуатации, причем за возможно короткий срок и с высоким качеством [22]. По этим причинам процессы, модели и механизмы применения виртуальной реальности для изменений производственной среды неприменимы для управления инженерными изменениями в изделиях, здесь нужны новые подходы. В некоторых публикациях предпринимаются попытки разработки инструментов *AR/VR* для управления инженерными изменениями [3], однако вопрос требует более глубокой проработки для радиоэлектронного приборостроения и привязки использования инструментария *AR/VR* к этапам жизненного цикла инженерных изменений, обозначенных на рисунке 2.

На практике процессы отработки, доводки и совершенствования прибора начинаются у разработчика, продолжаются во время технологической подготовки производства и заканчиваются иной раз в ходе производственного выпуска и эксплуатации изделия. Доводка изделия в производстве нередко заставляет существенно пересмотреть принятые разработчиком конструктивные решения, подвергнуть основательным изменениям переданные изготовителю чертежи и другую конструкторскую и технологическую документацию. Таким образом, процессы отработки технологичности конструкций приборов на этапах технологической подготовки производства и начала серийного выпуска большей частью проявляются в виде генерации требований на изменения, оформления извещений и внесения в КД соответствующих инженерных изменений.

Самыми эффективными и малозатратными в реализации являются инженерные изменения, внесенные самими разработчиками изделия в лице конструкторов, схемотехников, материаловедов и других специалистов на этапах проектирования. При внесении изменений на этапах разработки технического задания и структурной схемы изделия, принципиальных схем на уровне отдельных блоков и всей конструкции прибора (эскизный и технический проекты) согласование идет в обычном рабочем режиме на уровне подразделений разработчика без оформления дополнительной документации и, таким образом, не требует значительных затрат для реализации.

После изготовления и испытаний опытного образца прибора в ходе отработки технологичности его конструкции наблюдается второй поток генерации инженерных изменений, который по объему чаще всего превышает первый поток и требует затрат на проведение новых расчетов, корректировку КД, изменение конструкции или изготовление нового образца, проведение повторной серии испытаний и др. При этом изменения в конструкторские документы опытного образца до присвоения литеры O_1 вносятся без выпуска извещений на основании записей журнала изменений.

В ходе передачи КД разработчиком изготовителю на стадии разработки рабочей документации проводится технологический контроль документов, что также вызывает появление определенного количества конструкторско-технологических изменений,

вызванных проверкой и выявлением нетехнологичных решений, связанных со сборкой составных частей прибора, удобством и доступностью регулировки, настройки и ремонта, возможностью обеспечения взаимозаменяемости составных частей и др.

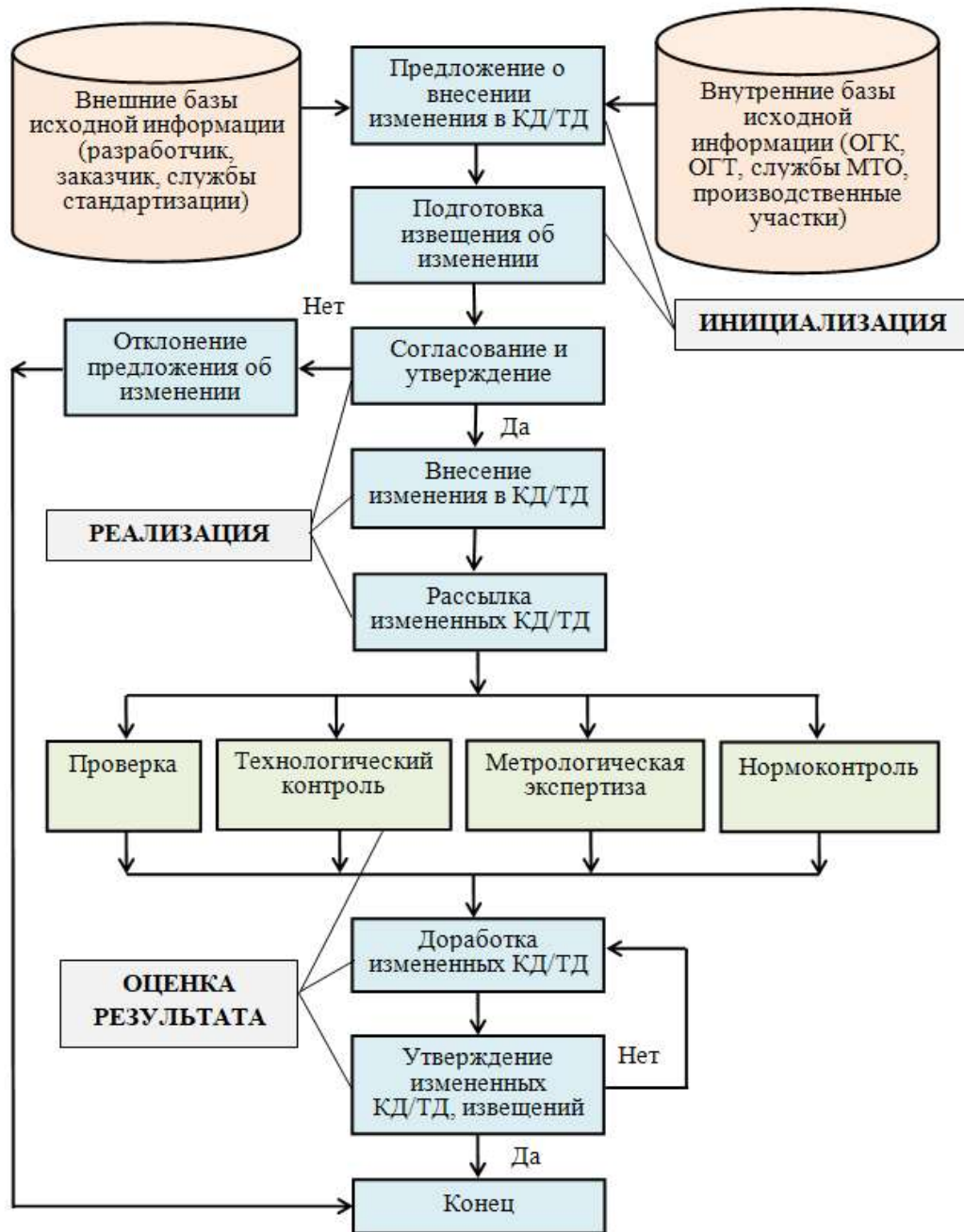


Рисунок 2 – Этапы и информационные потоки при проведении требований об инженерных изменениях на предприятии радиоэлектронного приборостроения:

КД – конструкторская документация; ТД – технологическая документация; ОГК – отдел главного конструктора; ОГТ – отдел главного технолога; МТО – материально-техническое обеспечение

На этапах технологической подготовки производства протекают сложные процессы согласования конструкции с технологией, принятие технологических решений для установочной серии прибора, проектирование средств технологического оснащения, контрольные испытания и разработка технологии серийного производства прибора, нормоконтроль КД. При этом наблюдаются довольно значительные по объему потоки требований на изменения, причем большей частью исходящие от специалистов конструкторских, технологических служб, производственных участков и служб комплектации

и материально-технического обеспечения предприятия-изготовителя, согласуемые с разработчиком и заказчиком.

На этапе серийного производства параллельно с эксплуатацией уже выпущенных партий прибора, как показывает практика, может продолжаться внесение инженерных изменений и устранение ошибок в документации на освоенное изделие. Потребитель генерирует информацию о недостатках и возможных изменениях в изделии, анализируя которую, изготовитель и разработчик могут принять решение о модернизации конструкции с учетом морального износа, что требует корректировки и развития системы по проектированию и изготовлению специального технологического оснащения, пересмотру мощностей инструментальной базы. Таким образом, на любом серийном предприятии функционирует система обработки информации об инженерных изменениях, куда входят специалисты различных технических и производственных подразделений изготовителя.

Информационный поток требований на изменения оформляется в виде извещений на изменения, если исходят от разработчика или предложений об изменениях, инициаторами которых могут быть специалисты предприятия-изготовителя, заказчик, др. сторонние организации. На предприятии возможны процессы проведения изменений в КД по извещениям от сторонних организаций-держателей подлинников, либо проведение собственных предложений на изменения. При этом на предприятии циркулируют информационные потоки, связанные с генерацией, рассмотрением, согласованием и внесением в документацию инженерных изменений.

Концептуальные подходы к поддержке управления инженерными изменениями с помощью технологий виртуальной *VR* и дополненной *AR* реальности

Таким образом, процессы управления инженерными изменениями в радиоэлектронном приборостроении можно формализовать в виде трех этапов (фаз), в каждом из которых выделим по три действия (рисунок 3). Фаза инициализации является отправной точкой инженерного изменения: среди проектировщиков, изготовителей или заказчиков сначала созревает необходимость изменения (1.1), затем проводится расширенный анализ требований и последствий изменения в изделии (1.2) и, наконец, формируется предварительное описание изменения (1.3).

Вторая фаза направлена на безболезненные для текущих процессов проектирования, производства и эксплуатации разработку, согласование и проведение через вовлеченные в этот процесс подразделения документов (извещений) на инженерные изменения. Фаза внедрения состоит из следующих шагов: планирование процесса изменения с определением сроков реализации, исполнителей, требующихся ресурсов (2.1), формирование проекта инженерного изменения в виде текста и чертежа (3D-модели) (2.2) и внедрение изменений в КД, создание опытного образца конструкции с изменением и реализация серийного производства приборов с изменением (2.3).

Заключительная фаза направлена на документирование знаний исполнителей, полученных в ходе реализации изменения, оценку эффективности изменения и состоит из следующих действий: стабилизации и воспроизводимости изменения в серийном производстве (3.1), оценка экономического эффекта, получаемого от внедренного инженерного изменения, успешности его, пользы для развития и повышения конкурентоспособности приборостроительного предприятия (3.2), накопление в базе предприятия опыта разработки и внедрения инженерного изменения с целью предотвращения повтора ошибок в проектировании и производстве (3.3).

Выделим свойства *AR/VR*, которые позволяют применять их для управления инженерными изменениями:

1. Сотрудничество. *AR* используется для совместной работы реального и виртуального мира. Поэтому его можно использовать, например, для наложения будущих инженерных изменений на текущую производственную систему для их визуализации. *VR* используется при взаимодействии нескольких участников для планирования, моделирования и оценки эффективности возможных инженерных изменений до их реализации.

2. Погружение. *AR/VR* создает впечатление физического присутствия в нефизическом или частично физическом мире, что облегчает понимание изменений, требований к

конструкции и технологии, процесса реализации, а также последствий внедрения инженерного изменения в изделие и производство.

3. Аннотации. Интересующие объекты (элементы, конструкции, микроблоки и др.) виртуально выделяются с добавлением к ним аннотаций для поддержки последующих шагов по выявлению конструкторско-технологических ошибок и необходимых изменений в конструкции прибора или технологии изготовления. Для *AR* информация может быть напрямую связана с оборудованием реальной производственной системы. В *VR* аннотации также могут быть добавлены, но они основаны на базовой *3D*-модели, а также на опыте пользователей.



Рисунок 3 – Фазы управления инженерными изменениями на предприятии

4. Взаимодействие: инженерные изменения часто зависят от взаимодействия между вовлеченными участниками. Визуализируя объект рассмотрения (например, прибор), можно уменьшить неправильные представления. Взаимодействия с помощью *VR* проще, с *AR* взаимодействия могут быть более сложными, так как для реализации требуется больше затрат на аппаратную часть, например, несколько смарт-очков для совместного просмотра.

Проведем анализ каждого шага процесса управления инженерными изменениями с точки зрения применимости и эффективности инструментария *AR/VR*-технологий. Выделим

цели и операции каждого шага трех фаз управления инженерными изменениями на приборостроительном предприятии.

1. Инициализация.

1.1. Осознание необходимости изменений.

Цель: систематическая или случайная идентификация конструкторско-технологических изменений.

Операции: сбор информации; учет обратной связи от потребителей продукции; обсуждение конструкторами и технологами выпускаемых на предприятии изделий; прослеживание требований к продукции.

1.2. Анализ требований к изменениям.

Цель: идентификация затрагиваемых объектов планирования и определение необходимых шагов для реализации изменений, оценка затрат всех видов на их реализацию.

Операции: определение взаимосвязи между производственными объектами и их сетевой интенсивности на основе планов работ; определение шагов внедрения на основе истории производственных объектов; расчет стоимости и временных затрат.

1.3. Формулирование инженерного изменения.

Цель: создание инженерного изменения и его утверждение.

Операции: резюме анализа; создание извещения на изменение; утверждение извещения всеми заинтересованными службами предприятия.

2. Реализация.

2.1. Планирование процесса изменений.

Цель: детальное планирование и структурирование определенных шагов для инженерного изменения.

Операция: составление поэтапного плана разработки и внедрения инженерного изменения с назначением исполнителей работ.

2.2. Определение проекта изменения.

Цель: краткое изложение технических поправок; детальное планирование проекта изменений.

Операции: несколько запланированных инженерных изменений объединяются в проекты изменений.

2.3 Внедрение инженерного изменения.

Цель: контроль проекта изменений; испытание нового изделия с внедренными изменениями в производственной системе.

Операции: внедрение, управление и тестирование изменений на основе методов управления проектами.

3. Оценка результата.

3.1. Стабилизация результата.

Цель: выявление и документирование недостатков; непрерывное совершенствование.

Операции: выявление и документирование преобладающих недостатков в производстве в стандартизированной форме; результаты постоянно улучшаются.

3.2. Оценка эффекта от инженерного изменения.

Цель: оценка результата изменения; оценка реализации; выявление потенциала для улучшения.

Операции: оценка успешности изменения путем сравнения результата с ранее поставленными целями и графиком; вывод и документирование потенциала улучшения.

3.3. Накопление полученного опыта.

Цель: документирование результатов; ключевые слова результатов.

Операции: документированные знания снабжены ключевыми словами.

Требования к поддерживающей управлению инженерными изменениями *AR/VR*-технологии по свойствам представлены в таблице 1.

Анализ показывает, что технологии *AR* и *VR* могут использоваться параллельно на некоторых этапах управления инженерными изменениями и выполнять требования в разной степени. При ближайшем рассмотрении эти технологии взаимодополняют друг друга на трех этапах процесса управления инженерными изменениями (рисунок 4). Во-первых, на этапе инициализации должны быть идентифицированы сети между компьютерами, на основе этого

разрабатывается целевое состояние. *AR* может поддерживать визуализацию этой сети непосредственно в производственной системе, например, визуализацию материальных потоков. Напротив, виртуальная реальность больше подходит для планирования целевого состояния. Их сотрудничество позволяет объединить сетевую информацию и панорамированное целевое состояние инженерных изменений.

Таблица 1 – Процесс управления инженерными изменениями, его требования к поддерживающим технологиям и выполнение требований по характеристикам *AR/VR*.

Управление изменениями (рисунок 3)	Требования к поддерживающей технологии <i>AR/VR</i>	<i>AR</i>				<i>VR</i>				
		Сотрудничество	Погружение	Аннотации	Взаимодействие	Сотрудничество	Погружение	Аннотации	Взаимодействие	
Инициализация	1.1	Организация взаимодействия между несколькими участниками. Использование одного устройства для нескольких пользователей.	**	**	*	***	*	*	**	*
	1.2	Визуализация сетей между компьютерами. Анализ различных целевых состояний, например, симуляции. Разработка целевого состояния изменений. Учет исторических данных. Взаимодействие между участниками, например, обсуждения.	**	**	**	***	*	*	*	*
	1.3	Визуализация текущего состояния и планируемой реализации изменения.	*	**	**	***	*	*	**	*
Реализация	2.1	Визуализация текущего и целевого состояния изменения. Взаимодействие между несколькими участниками.	*	**	**	***	*	*	**	*
	2.2	-	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п
	2.3	Визуализация хода выполнения изменения, включая контроль и тестирование. Взаимодействие между несколькими участниками.	*	*	*	**	*	*	**	**
Оценка результата	3.1	Визуализация дефицитов и их документирование.	*	**	**	**	**	*	**	*
	3.2	Выявление прежнего и целевого состояния для выявления отклонений. Взаимодействие между несколькими участниками. Документирование результатов.	*	*	*	**	*	*	*	*
	3.3	-	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п

Обозначения: * выполнено, ** выполнено частично, *** не выполнено, н/п – не применимо

Во-вторых, при планировании процесса изменений возникает необходимость визуализации исходного состояния и целевого состояния объекта изменения. *AR* может предоставлять информацию непосредственно в производственной системе, такую как

инфраструктура, поток материалов, которые обычно не отображаются в конструкторской и технологической документации. Для планирования целевого состояния больше подходит *VR*, так как она основана на существующих данных и информации, его удобнее использовать для задачи планирования.

В-третьих, внедрение инженерных изменений требует контроля и проверки хода выполнения. Для отслеживания процесса больше подходит *AR*, поскольку она визуализирует изменения непосредственно в производственной системе. С другой стороны, виртуальная реальность отлично применима для совместной работы нескольких участников. Сотрудничество между *AR* и *VR*, например, между умными очками и *Powerwall*, облегчает контроль и тестирование процесса внесения изменений.

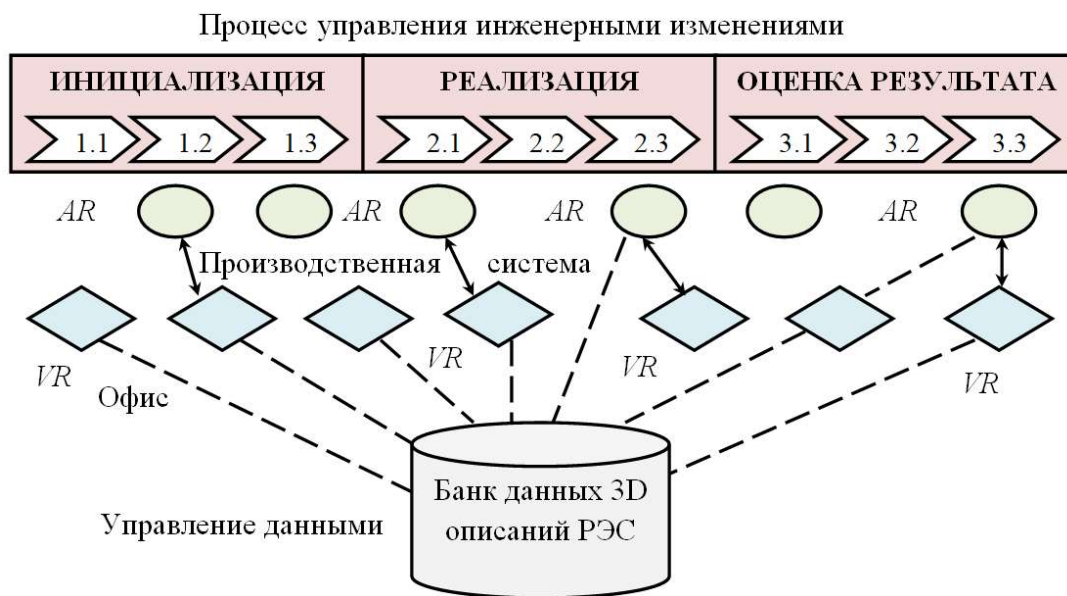


Рисунок 4 – Взаимодействие между дополненной реальностью и виртуальной реальностью для поддержки процесса управления инженерными изменениями

В-четвертых, *AR* и *VR* можно использовать для обнаружения отклонений между начальным и целевым состоянием объекта изменения. *AR* предоставляет возможность записывать производственную систему и передавать эту информацию в модель *VR*, где отклонения могут быть обнаружены путем наложения моделей.

Заключение. Используя инструменты *VR/AR*, можно реализовать полный жизненный цикл инженерных изменений приборов, начиная от возникновения требования на изменение, заканчивая его внедрением в изделие для повышения конкурентоспособности и качества прибора. Таким образом, можно заключить, что на данном этапе развития производственных процессов предприятий радиоэлектронного приборостроения технологии *VR/AR* можно применять для повышения качества продукции, снижения сроков подготовки производства и повышения уровня безопасности процессов. В работе рассмотрены концептуальные механизмы поддержки процессов внесения изменений при проектировании и производстве радиоэлектронных средств. В перспективе необходимо сформировать всеобъемлющий подход *VR/AR* для поддержки инженерных изменений. Это требует привязки к базам данных, в которых хранятся 3D-описания продукции и окружающей производственно-технологической среды. Этот единый источник может предоставить всю необходимую информацию для приложений *AR/VR* для реализации конкретных инженерных изменений. Это приведет к меньшему количеству ошибок при планировании процесса изменений, а также к упрощению и ускорению внедрения инженерных изменений в приборы.

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. 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, 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. 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. 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., Rößing, 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 radioelektronnogo 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 inzhenernykh izmenenij v konstrukciyu radioelektronykh 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

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

УДК 62-523

DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-141-148

Т.В. СИНЮКОВА, В.Н. МЕЩЕРЯКОВ, А.В. СИНЮКОВ

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.

Введение

Устройства, в функции которых входит перемешивание вязких веществ, таких как клей, до однородной консистенции, применяются на предприятиях разного рода. Оборудование данного рода отличается специфическим характером нагрузки. Характерной чертой систем управления механизмами для смешивания клея является отсутствие возможности получения сигнала обратной связи по скорости. В состав механизма, служащего для перемешивания клея входят электродвигатель, на валу которого через соединительную муфту установлены элементы, служащие для перемешивания клея. Механизмы для перемешивания клея работают в повторно-кратковременном режиме, сопровождающемся частыми пусками и торможениями.

Анализ предлагаемых методов модернизации систем управления электроприводами для перемешивания вязких веществ показывает, что в данном направлении ведутся исследования.

В работе [1] предложено устройство, для регулирования процесса перемешивания, позволяющее повысить однородность смеси. Разработанное устройство дает возможность достичь эффекта энергосбережения, это происходит благодаря созданию инерционных сил в перемешиваемой жидкости. Предлагаемое решение, предусматривает только фиксированное задание на глубину воронки в аппарате для перемешивания, что не всегда выполнимо. Также в системе не предусмотрено повышение пускового момента электропривода.

Система управления с использованием регулируемого электропривода рассмотрена в работе [2]. Для получения однородности перемешиваемого состава осуществляется контроль последовательности загрузки, скорости ротора, положение плунжера в текущий момент, происходит постоянное снятие показателей температуры на этапе смешивания, контролируются затраты труда. В устройствах данного рода, актуальным направлением при модернизации подобных систем является регулирование процессов перемешивания с целью улучшения показателей качества и однородности продукта. В данном случае, процесс модернизации направлен на включение в систему управления функции регулирования

скорости. Положительной составляющей данного способа является снижение пиковых затрат энергии.

В работе [3] рассмотрена векторная, частотно-токовая система управления электроприводом. Данная система управления дает возможность обеспечить крутящий момент до величины 1,5 о.е. в состоянии покоя, что позволяет перемешивать состав с имеющей повышенную вязкость.

Хорошо зарекомендовали себя системы, имеющие в своем составе блоки, функционирующие на базе искусственного интеллекта. В [4] предложено в традиционный ПИД-регулятор внести коэффициент изменения частоты ошибок, для формирования новой нечеткой структуры ПИД-управления.

В статье [5] предложено дополнить традиционный ПИД-регулятор нечетким управлением. Данное устройство позволит добиться энергосберегающего эффекта.

Анализ работ показывает преимущество использования регуляторов с нечеткими законами управления. При формировании многофункциональных управляющих воздействий, возникает следующая особенность, их связь не определена аналитически или отклоняющее воздействие на систему автоматического управления не постоянно по уровню и динамичности [6, 7].

Основная часть

В состав структурной схемы механизма перемешивания клея, представленной на рисунке 1, входят электрический двигатель М, который получает питание от источника переменного тока через контактор, включение которого регулирует генератор тактовых импульсов. Вал двигателя соединен с элементом для перемешивания. Перемешивающее устройство находится в резервуаре, в который поступает клеевой состав. В системе управления имеется блок расчета, который на основании данных о мгновенных фазных значениях токов и напряжений и времени перемешивания состава и ожидания, считает максимальные за период доведения клеевого состава до нужной консистенции значения тока и потребляемой энергии, полученные данные позволяют анализировать характер процесса со стороны энергетической составляющей.

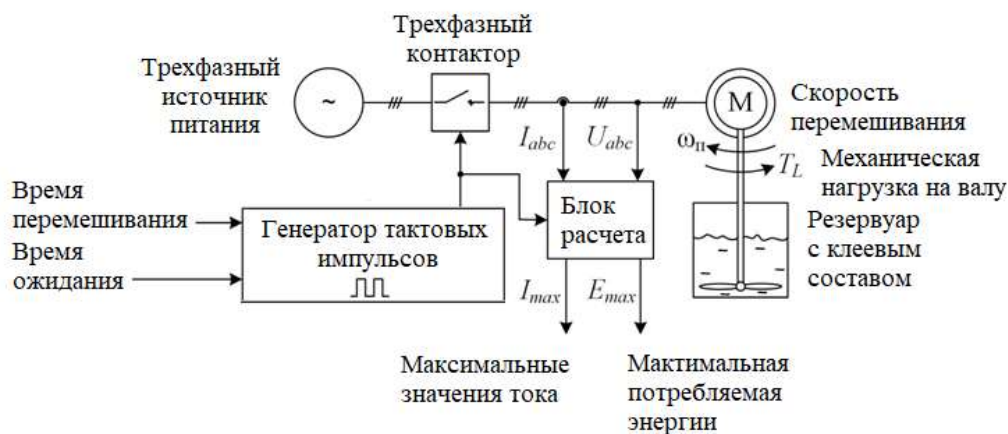


Рисунок 1 – Система управления механизмом перемешивания клея

Параметры времени перемешивания и времени ожидания меняются в зависимости от клеевого состава, его компонентов и объема, при этом скорость перемешивания имеет фиксированное значение, ее изменение на прямую зависит от значения механической нагрузки на валу.

Время ожидания (t_0) сопровождается затормаживанием электропривода, в это время наблюдается повышение динамической вязкости клеевого состава. Период перемешивания (t_n) характеризуется снижением вязкости. Все показатели вязкости, скорость кристаллизации клеевого состава обычно определяются в зависимости от состава клея. Соответственно, использование одинаковых временных параметров при перемешивании состава и в период

остановки механизма не актуально, так как приводит к перегреву двигателя, увеличению расхода электроэнергии, поэтому стандартная схема (рисунок 1) нуждается в модернизации.

В работе, для устранения выше указанных проблем предлагается внедрение в систему управления вместо трехфазного контактора частотного преобразователя (ПЧ), управление которым осуществляется от нечеткого регулятора (НР) (рисунок 2). В предлагаемом варианте системы управления регулирование скорости перемешивания клеевого состава осуществляется частотным преобразователем. Формирование.

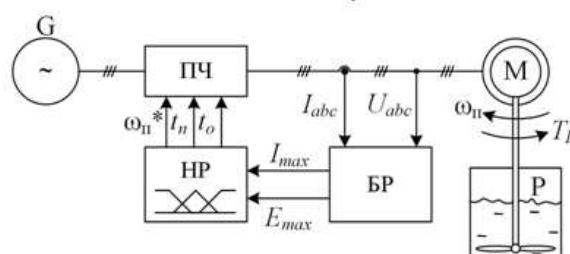


Рисунок 2 – Модернизированная система управления механизмом перемешивания клея

На выходе нечеткого регулятора формируются сигналы периодов ожидания и времени перемешивания, скорости перемешивания – сигналы задания, поступающие на частотный преобразователь. Входными сигналами нечеткого регулятора являются максимальные значения тока и потребляемой энергии.

Реализация нечеткого регулятора предлагается на базе алгоритма Мамдани. Новизна предлагаемого решения заключается в создании нечеткого регулятора не заимствованного из библиотеки MATLAB Simulink. Положительной составляющей предлагаемого решения является ускорение процесса моделирования, снижение необходимого вычислительного ресурса.

На этапе фаззификации приняты следующие лингвистические термы: М – маленький; С – средний; Б – большой.

Исходная база правил имеет следующее логическое представление:

1. Если ток М & потребляемая энергия М, то заданная скорость С & время перемешивания С & время остановки Б;
2. Если ток М & потребляемая энергия С, то заданная скорость М & время перемешивания М & время остановки С;
3. Если ток М & потребляемая энергия Б, то заданная скорость М & время перемешивания М & время остановки М;
4. Если ток С & потребляемая энергия М, то заданная скорость С & время перемешивания Б & время остановки С;
5. Если ток С & потребляемая энергия С, то заданная скорость С & время перемешивания С & время остановки С;
6. Если ток С & потребляемая энергия Б, то заданная скорость С & время перемешивания М & время остановки М;
7. Если ток Б & потребляемая энергия М, то заданная скорость Б & время перемешивания Б & время остановки С;
8. Если ток Б & потребляемая энергия С, то заданная скорость Б & время перемешивания Б & время остановки М;
9. Если ток Б & потребляемая энергия Б, то заданная скорость С & время перемешивания С & время остановки М.

На этапе агрегатирования найдены степени истинности для лингвистических терм (рисунок 3).

При активизации был найдены весовые коэффициенты для всех подзаключений. В основе лежит алгоритм Мамдана, при активизации применена функция минимума (рисунок 4).

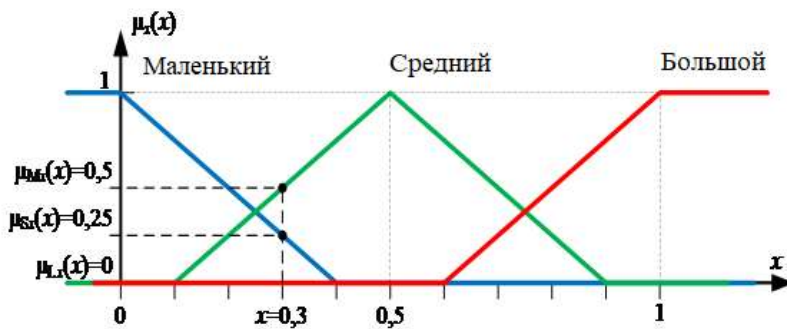


Рисунок 3 – Визуальное отображение функций

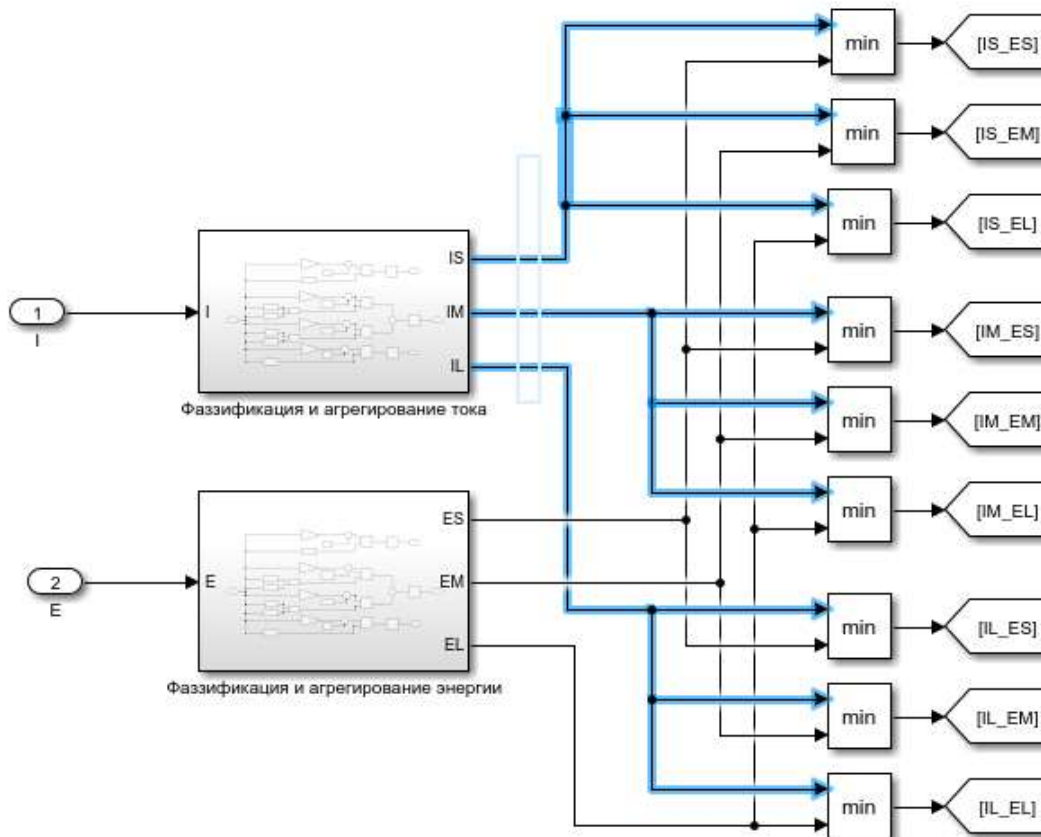


Рисунок 4 – Структуры блоков «агрегирование» и «активация»

Далее на стадии аккумуляирования используются приведенные выше правила нечеткого вывода.

Последним этапом является дефаззификация, при которой происходит нахождение четких значений функции принадлежности путем преобразования нечетких терм в четкие данные (рисунок 5).

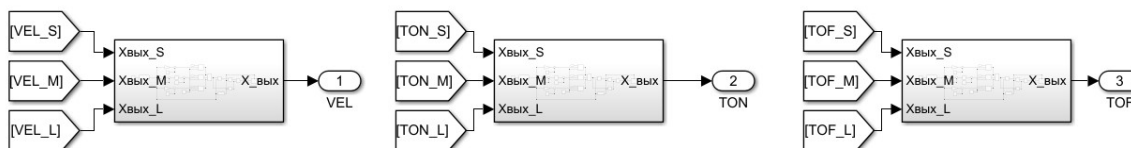


Рисунок 5 – Модель системы дефаззификации

При разработке нечеткого регулятора масштабирование входных сигналов нечеткого регулятора происходит до условных единиц, а выходные масштабируются до максимальных значений.

Моделирование системы управления с предложенным нечетким регулятором проводилось в среде Matlab Simulink, полученные результаты сравнивались с исходной схемой. На рисунке 6 приведены графики формирования скорости. При использовании в системе управления нечеткого регулятора в течение 30 секунд работы происходит формирование 17 периодов регулирования скорости. При этом заметно, что процесс сопровождается регулированием скорости, и состоит из периодов перемешивания и ожидания. Регулирование скорости происходит в диапазоне 80 – 140 рад/с, что соответствует термам «Средняя» и «Большая» регулятора. Регулирование времени перемешивания осуществляется в период с 1 по 1,75 с, что также соответствует термам «Средняя» и «Большая» регулятора. Процесс регулирования времени ожидания наблюдается в диапазоне от 0,2 до 0,6 с, что соответствует термам «Маленькая» и «Средняя» регулятора.

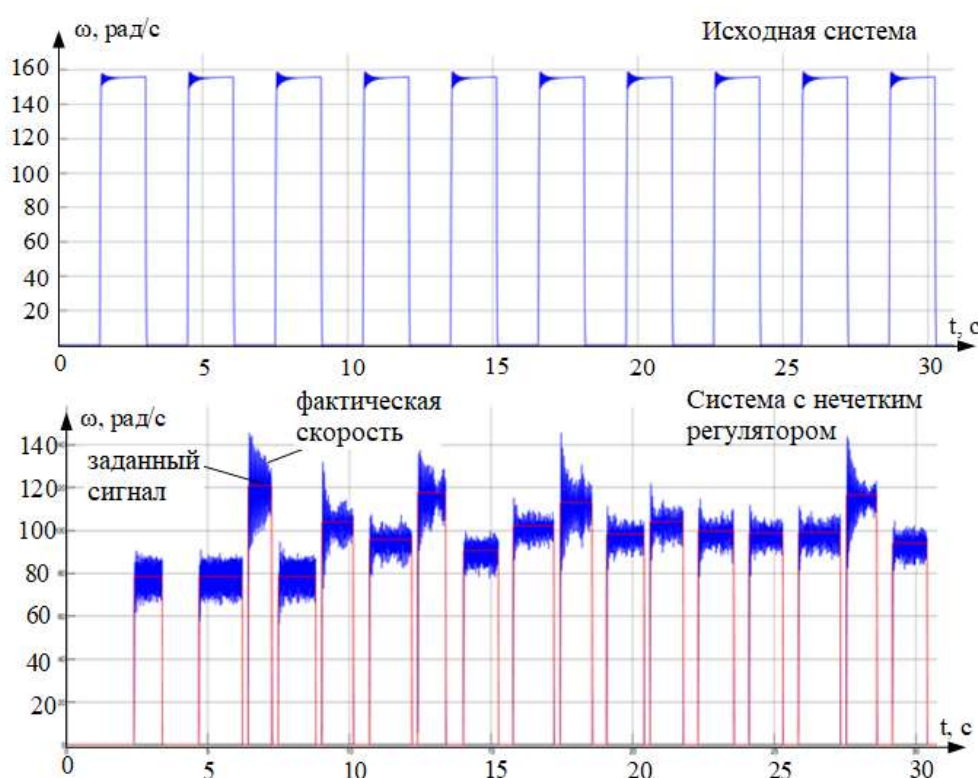


Рисунок 6 – Скоростные характеристики

При использовании исходной системы управление изменение величины момента нагрузки при перемешивании, пропорционально вязкости клеевого состава (рисунок 7), согласно технологическому процессу.

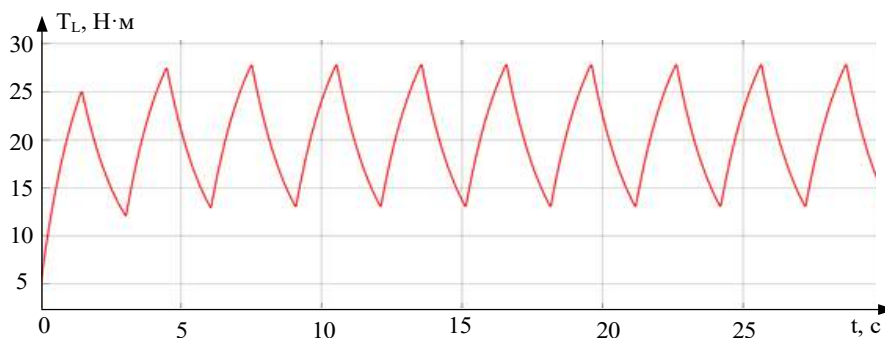


Рисунок 7 – Характеристика момента нагрузки в исходной системе

При использовании в системе управления нечеткого регулятора процесс регулирования осуществляется за счет контроля величины пускового тока, при этом происходит ограничение значения нагрузки до 27 Н·м. Колебание нагрузки при использовании нечеткого регулятора наблюдается в диапазоне 16 – 25 Н·м, тогда как в исходной системе регулирование нагрузка происходит в интервале от 13 до 27 Н·м, приведенные показатели объясняются повышенной частотой включения двигателя. Среднее значение нагрузки на валу для обеих систем управления имеет практически одинаковое значение около 20,25 Н·м. Повышение скорости вращения двигателя сопровождается быстрым снижением нагрузка, что связано с характером нагрузки (рисунок 8).

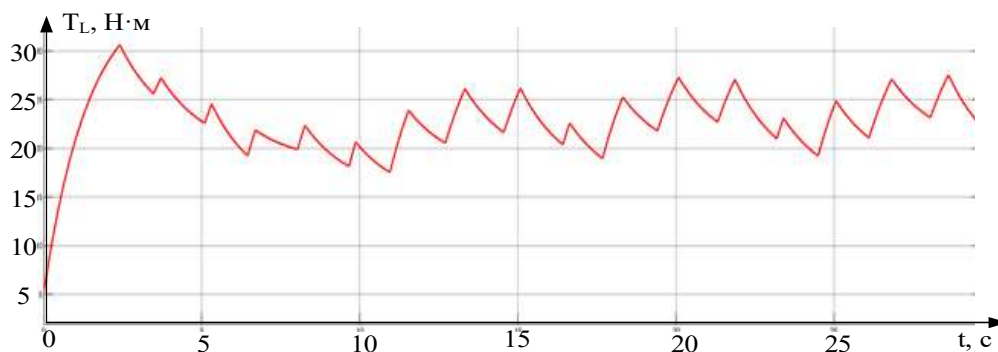


Рисунок 8 – Характеристика момента нагрузки в системе с нечетким регулятором

Формирование процесса потребления энергии при использовании исходной системы управления показано на рисунке 9. Горизонтальные участки фиксированного типа соответствуют периоду ожидания электропривода, на этом этапе происходит возрастание вязкости клеевого состава. Потребленная электроприводом энергия за период перемешивания фиксируется интегратором. На начальном этапе перемешивания накопленная интегратором энергия сбрасывается, а далее происходит ее скачкообразный практически линейный рост, так как наблюдается запуск двигателя. Линейный характер роста потребления электроэнергии наблюдается в течение всего периода перемешивания клеевого состава.

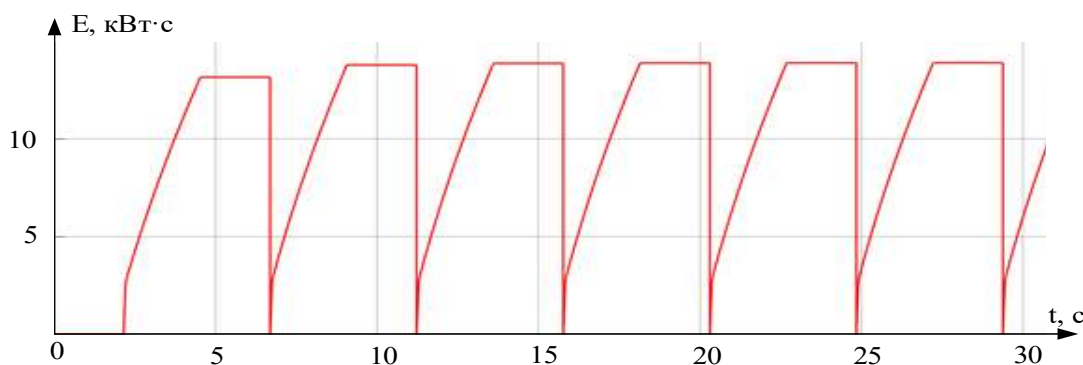


Рисунок 9 – Характер потребления энергии в исходной системе

Использование в системе управления электрическим двигателем нечеткого регулятора приводит к снижению потребления электрической энергии за период перемешивания (рисунок 10). В данном случае потребляемая электроприводом энергия лежит в диапазоне от 5,2 до 7 кВт·с, в отличие от исходной системы управления, при которой значение потребляемой электроэнергии доходит до 9,48 кВт·с. Анализ графика показывает, что потребление энергии за период перемешивания снижается от 26,16 до 45,15 %.

По прошествии 30 секунд в системе с нечетким регулятором наблюдается потребление энергии, равное 104,6 кВт·с, при этом в исходной системе управления имеющей фиксированные значения периодов включения и скорость, потребляемая электроэнергия составляет 123,5 кВт·с. Следовательно, использование системы управления с разработанным нечетким регулятором приводит к снижению потребления электрической энергии до 15,3 процентов.

Не смотря на то, что достигнуты некоторые показатели по снижению энергопотребления и уменьшению пускового тока, наблюдается увеличение

продолжительности работы электропривода при данном типе управления от 61 % до 88%, при этом стандартное управление предусматривает продолжительность включения равную 52,38%. Следовательно, появляется необходимость в дополнительном анализе теплового баланса двигателя.

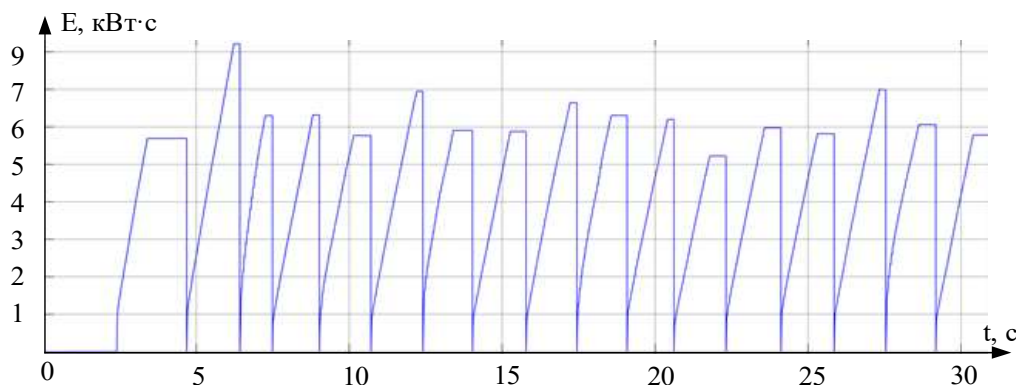


Рисунок 10 – Характер потребления энергии в системе с нечетким регулятором

Использование нечеткого регулятора приводит к снижению потребления электрической энергии за период от 5,2 до 7 кВт·с, при этом при стандартном управлении потребление электроэнергии было на уровне 9,48 кВт·с. Следовательно использование нечеткого регулятора привело к снижению электроэнергии на 26,16 – 45,15 %.

Заключение

По результатам, полученным в ходе исследования, можно сделать следующие выводы:

- предложенная модель системы содержащей в своей структуре нечеткий регулятор нуждается в меньшей вычислительной мощности;
- предложенная система позволяет автоматически рассчитывать с помощью регулятора время перемешивания и ожидания;
- благодаря присутствию в системе нечеткого регулятора происходит автоматическая реакция системы на изменение параметров нагрузки и подстройка регулируемых параметров в зависимости от показателей возмущающих воздействий;
- использование в системе управления разработанного регулятора приводит к снижению энергопотребления.

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 смещения 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 VISCOUS 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

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 качения; подшипник качения; электрическое сопротивление

Введение

Качество, надёжность и безопасность электрических машин определяется их техническим состоянием, которое зависит от степени соответствия размеров и параметров элементов электрической машины своим номинальным значениям. Большую роль в формировании технического состояния электрической машины имеют опоры качения, так как они испытывают наиболее интенсивные механические нагрузки. Состояние опоры качения определяется параметрами её основного элемента – подшипника качения. Таким образом, для определения технического состояния опоры качения электрической машины необходимо оценивать качество подшипников, входящих в состав данной опоры.

Подшипники качения являются стандартными изделиями, и в состоянии поставки имеют высокое качество, надёжность и долговечность; многие современные подшипники имеют встроенную систему самосмазывания с искусственным интеллектом. Однако, высокое качество подшипника не обеспечивает полной уверенности в работоспособности опоры качения, в которой собран данный подшипник, так как его фактическое состояние в опоре определяется сборкой и режимами эксплуатации опоры. Факторы сборки и эксплуатации опоры качения могут существенно изменить состояние подшипника и электрической машины в целом.

Среди известных методов мониторинга опор качения выделяют электрические методы. Эти методы универсальные, относительно простые в реализации и безынерционные. Разновидностью электрических методов мониторинга опор качения являются электрорезистивные методы. Они основаны на физическом явлении зависимости электрического сопротивления подшипника от факторов его внутренней среды, режимов сборки и эксплуатации опоры качения. Электрорезистивные методы мониторинга опор качения стали известными во второй половине XX века, а сведения о них опубликованы во многих обзорных работах, в частности, в работах [1, 2].

Известной группой электрорезистивных методов мониторинга опор качения являются методы мониторинга по времени соприкосновения металлических поверхностей колец и тел качения подшипников. Данные методы впервые были разработаны учёными А.Ф. Блиновым, С.Ф. Корндорфом и К.В. Подмастерьевым в период с 1976 по 1986 гг., впоследствии получили развитие в трудах их научной школы, а базовый диагностический параметр получил аббревиатуру «НИВ» – «нормированное интегральное время» [1].

Применение параметра НИВ ограничено двумя условиями: режимом смешанной смазки в подшипнике и временем определения среднего значения параметра [1-3]. Более универсальным признаком состояния опоры качения является электрическое сопротивление.

Целью данной работы является описание результатов разработки метода мониторинга опоры качения по параметрам её электрического сопротивления. Параметры электрического сопротивления позволяют проводить комплексную оценку состояния опоры качения, а также выявлять отдельные дефекты её элементов в произвольных режимах смазки.

Теоретическая база электрорезистивного мониторинга опоры качения

Теоретической основой электрорезистивного метода мониторинга опоры качения является математическая модель электрического сопротивления подшипника. Подшипник

качения – это сложная техническая система, в которой происходит совместное действие факторов механической, гидродинамической и электрической природы. Моделирование электрического сопротивления подшипника основано на использовании нескольких фундаментальных теорий, подробное описание которых представлено в работе [3]. Механические факторы моделированы в соответствии с теорией контакта реальных поверхностей научной школы Н.Б. Демкина [4]. Состояние смазочной плёнки описано в соответствии с гидродинамической теорией смазки научной школы Д.С. Коднира [5]. Электрическое сопротивление фрикционного контакта моделировано в соответствии с теорией электропроводности контакта двух шероховатых тел научной школы А.В. Белого и Н.К. Мышкина. Связи между отдельными фрикционными контактами в пределах пятен касания тел и колец подшипника моделируются распределением Найака [6, 5].

Основным структурным элементом подшипника качения, как трибологического объекта, принят элементарный фрикционный контакт, а переход от сопротивления фрикционного контакта к сопротивлению подшипника в целом осуществляется в соответствии с уравнениями М.П. Ковалева и Н.З. Народецкого [7]. Для фрикционного контакта учитывается сопротивление стягивания R_{ST} и сопротивление смазочной плёнки R_{SP} , определяемые через удельные сопротивления контактирующих поверхностей (ρ), туннельных поверхностных смазочных плёнок (ρ_P), граничной плёнки (ρ_{GP}) и объёмного смазочного материала (ρ_{SM}). В расчёт принимается толщина смазочной плёнки в контакте (h) в пределах площади (S_h), радиусы пятен контакта для внутреннего (V) и наружного (N) колец подшипника ($r_{V(N)}$) и число пятен контакта в пределах зон трения (n_p):

$$\begin{cases} R_{ST} = \frac{\rho}{2 \cdot n_p \cdot r_{V(N)}}, h < 3 \text{ nm}; R_{SP} = \frac{\rho_P}{\pi \cdot n_p \cdot r_{V(N)}^2}, 3 \leq h < 10 \text{ nm}; \\ R_{SP} = \rho_{GP} \cdot \frac{h}{S_h}, 0,01 \leq h < 1 \mu\text{m}; R_{SP} = \rho_{SM} \cdot \frac{h}{S_h}, 1 \leq h \leq 30 \mu\text{m}. \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) позволяет учесть возможные режимы смазки в подшипнике: сухое, граничное и жидкостное трение. Она положена в основу математической модели.

Математическая модель электрического сопротивления подшипника представлена системой уравнений (1-10). Уравнения (2) и (3) служат для расчёта сопротивления контакта:

$$R_{ST} = a_R \cdot \Psi_R(h); R_{SP} = R_{ST} \cdot \frac{\rho_{SM}}{\rho_M} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r}; a_R = \frac{\rho_M}{2 \cdot N \cdot \sqrt{\beta \cdot d}}; \quad (2)$$

$$\Psi_R(h) = \left| L\left(\frac{d}{R_q}\right) \cdot \left[1 - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right] + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \left[\frac{1}{2} - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2R_q^2}\right) - \frac{1}{4} \right|^{-0.5}; \beta = \sqrt{r_{pr} \cdot r_{pop}}. \quad (3)$$

Для расчёта сопротивления стягивания R_{ST} должны быть заданы: вспомогательные переменные функции электрического сопротивления a_R и $\Psi_R(h)$; удельное электрическое сопротивление смазочного материала (ρ_{SM}) и металлических поверхностей (ρ_M); наименьшая толщина смазочной плёнки в пределах пятна контакта (h_0); фактическая (A_r) и контурная (A_c) площади контакта. В формулах функций a_R и $\Psi_R(h)$ использованы параметры: интегральная функция Лапласа $L(d/R_q)$; радиус закругления микронеровностей (β), учитывающий радиусы неровностей в продольном (r_{pr}) и поперечном (r_{pop}) направлениях; номинальный зазор между телом качения и кольцом подшипника (d); количество неровностей (N) профиля в пределах номинальной площади контакта (A_a) тел качения и колец подшипника; среднеквадратическое отклонение высоты неровностей от средней линии профиля в пределах базовой длины (R_q).

Основным фактором, формирующим электрическое сопротивление контакта, является фактическая площадь контакта (A_r), определяемая, как некоторая часть контурной площади контакта (A_c). Функции для расчёта A_r и A_c заданы уравнениями (4) и (5):

$$A_r = \pi \cdot N \cdot \beta \cdot d \cdot \left[L\left(\frac{d}{R_q}\right) + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{2} \right]; d = R_p - \delta; N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}; \quad (4)$$

$$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \Sigma \rho}\right)^2 - A_D}; \delta = h - d = \sqrt[3]{\Sigma \rho} \cdot \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{2 \cdot K}{\pi \cdot n_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1 - \eta^2}{E}\right)^2} \cdot F_r^2 \right]. \quad (5)$$

Для расчёта A_r и A_c должны быть заданы параметры, указанные выше, а также: сближение тела качения и кольца (δ); высота неровностей поверхностей (h) и безразмерная высота неровностей (h_1); площадь локального дефекта на поверхности (A_D); шаг неровностей профиля в продольном (S_{m1}) и поперечном (S_{m2}) сечениях; приведенная высота сглаживания неровностей профиля поверхностей 1 и 2 ($R_p = R_{p1} + R_{p2}$); коэффициенты n_a , n_b и $(2 \cdot K / \pi \cdot n_a)$, учитывающие форму контактирующих поверхностей; геометрический параметр суммы главных кривизн контактирующих поверхностей ($\Sigma\rho$); модуль упругости (E); коэффициент Пуассона (η); сила нормального нагружения фрикционного контакта (F_r).

Уравнение контурной площади контакта A_c позволяет учесть влияние на электрическое сопротивление контакта двух видов отклонений формы поверхности: локальных дефектов (лунки, раковины, риски и т.п.) и регулярных макроотклонений (эксцентриситет, овальность, огранка дорожки качения кольца подшипника). Влияние локальных дефектов учитывается введением в уравнение (5) параметра площади локального дефекта A_D . Влияние макроотклонений оценивается косвенно, через сумму главных кривизн поверхностей ($\Sigma\rho$):

$$\Sigma\rho = \Sigma\rho_0 + \sum_{k=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k), \quad (6)$$

где $\Sigma\rho_0$ – сумма главных кривизн для контакта поверхностей с номинальным профилем;
 Q_k, φ_k – амплитуда и фазовый угол k -й гармоники макроотклонения;
 k – номер гармоники (1 – эксцентриситет, 3 – овальность, 3 – трехвершинная огранка);
 p – предельный номер учитываемой гармоники.

Случайная функция фактической площади контакта A_r зависит от закона распределения случайной переменной безразмерной высоты неровностей контактирующих поверхностей h_1 , которая описана распределением Найака и задана уравнениями (7) и (8):

$$f(h_1) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & h_1 \cdot \sqrt{\frac{3(2\alpha - 3)}{\alpha^2}} \cdot \exp(-C_1 \cdot h_1^2) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} \cdot (h_1^2 - 1) \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2(2\alpha - 3)}} \right) \right] \times \\ & \times \exp\left(-\frac{h_1^2}{2}\right) + \sqrt{\frac{2\pi\alpha}{3(\alpha - 1)}} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha - 1)(2\alpha - 3)}} \right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{\alpha h_1^2}{2(\alpha - 1)}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

$$h_1 = \frac{h}{\sqrt{m_0}}; \quad \alpha = \frac{m_0 \cdot m_4}{m_2^2}; \quad C_1 = \frac{\alpha}{2 \cdot \alpha - 3}, \quad (8)$$

где m_0, m_2, m_4 – моменты спектральной плотности высоты неровностей.

Выражения (1) – (8) моделируют электрическое сопротивление контакта одного тела качения с кольцами подшипника. Для расчёта сопротивления подшипника в целом его представляют, как параллельное соединение контактов всех тел качения, а сопротивления контакта каждого тела качения с кольцами определяют решением задачи распределения силы нормального нагружения между телами качения подшипника [9].

Составленная математическая модель электрического сопротивления подшипника позволяет оценить влияние на электрическое сопротивление опоры качения: геометрических параметров деталей подшипника, шероховатости, локальных дефектов и регулярных макроотклонений рабочих поверхностей тел качения и колец подшипника, режимов и условий эксплуатации опоры качения, свойств смазочного материала.

Электрорезистивный метод мониторинга опоры качения

Сущность электрорезистивного метода мониторинга заключается в оценке технического состояния опоры качения по параметрам электрического сопротивления. Контроль проходит в два этапа: усредненная комплексная оценка технического состояния; оценка формы и размеров отклонений формы дорожек качения колец подшипника, нагруженных местным или циркуляционным нагружением. В качестве диагностических параметров используются:

- параметр R_s – среднее арифметическое значение сопротивления подшипника, усреднённое за время, равное периоду вращения его подвижного кольца;

- параметр K_n – отношение мощности гармонической составляющей функции сопротивления подшипника от времени $R(t)$ на информационной частоте к мощности несущей гармоники функции $R(t)$:

$$K_n = (\sigma_{RFi})^2 / (\sigma_{R0})^2; \quad F_i = F_0 \cdot M; \quad F_i = F_s \cdot z + F_0 \cdot M \cdot L; \quad F_i = F_s \cdot z + 3 \cdot F_0 \cdot M, \quad (9)$$

где $(\sigma_{RFi})^2$ – мощность составляющей функции $R(t)$ на информационной частоте F_i , Вт;

$(\sigma_{Rf0})^2$ – мощность составляющей функции $R(t)$ на несущей частоте F_0 , Вт;
 F_0 – несущая частота (частота вращения кольца), Гц;
 F_s – частота вращения сепаратора подшипника, Гц;
 M – коэффициент формы макроотклонения (1 – эксцентриситет, 2 – овальность, 3, 4... n – огранка n -го порядка);
 L – эмпирический коэффициент пропорциональности, равный 1 или 2.

Разработанный электрорезистивный метод позволяет проводить мониторинг опоры качения по нескольким методикам, отличающихся видами выявляемых дефектов [10].

1 *Методика оценки общего состояния подшипника в опоре качения.* Данная методика основана на использовании диагностического параметра R_s и включает действия:

- выбирают объект мониторинга: выбирают электродвигатель, опоры качения которого подлежат мониторингу, определяют тип подшипников качения в опорах;
- оценивают режимы работы подшипников в опорах качения: нормальную нагрузку, скорость вращения колец, тип, марку и количество смазочного материала;
- включают объект и прирабатывают подшипники в течение 2 часов;
- измеряют диагностический параметр R_s за время, равное 10...50 периодам вращения кольца подшипника;
- по значению параметра R_s делают вывод о режиме смазки в подшипнике и о состоянии опоры качения (по результатам сопоставления измеренного значения параметра R_s со значением, допустимым для данного типа подшипника и данного режима смазки).

Данная методика проста в реализации, осуществляется с помощью относительно простых технических средств [11] и работоспособна во всех условиях смазки.

2 *Методика оценки макроотклонений деталей опоры качения с местным нагружением.* Данная методика позволяет оценивать качество опоры качения по состоянию кольца подшипника, испытывающего местное нагружение. Она основана на использовании диагностического параметра K_n и включает следующие действия:

- выбирают объект мониторинга: выбирают электродвигатель, опоры качения которого подлежат мониторингу, определяют тип подшипников качения в опорах;
- оценивают режимы работы подшипников в опорах качения: нормальную нагрузку, скорость вращения колец, тип, марку и количество смазочного материала;
- включают объект и прирабатывают подшипники в течение 2 часов;
- подключают опору качения к средству мониторинга, позволяющему измерять параметр R_s за время, равное 0,05...0,1 периода вращения кольца подшипника;
- исследуемое кольцо подшипника разбивают на n участков, каждый из которых подвергают местному нагружению с периодическим изменением угловой координаты вектора нормальной нагрузки F_r ;
- получают n отсчетов диагностического параметра R_s ;
- строят функцию зависимости диагностического параметра R_s от угловой координаты вектора нормальной нагрузки F_r и проводят её гармонический анализ;
- по экстремумам гармонических составляющих амплитудного спектра функции R_s определяют вид основного макроотклонения, присутствующего на кольце подшипника.

Достоинством данной методики является возможность управления долговечностью опоры качения по результатам выявления макроотклонений местно нагруженного кольца подшипника и выбора рационального положения данного кольца относительно нагрузки.

3 *Методика оценки макроотклонений деталей опоры качения с циркуляционным нагружением.* Данная методика основана на использовании диагностического параметра K_n и включает действия:

- выбирают объект мониторинга: выбирают электродвигатель, опоры качения которого подлежат мониторингу, определяют тип подшипников качения в опорах;
- оценивают режимы работы подшипников в опорах качения: нормальную нагрузку, скорость вращения колец, тип, марку и количество смазочного материала;
- включают объект и прирабатывают подшипники в течение 2 часов;
- подключают опору качения к средству мониторинга, позволяющему измерять параметр K_n на информационных частотах, рассчитанных по блоку формул (9);
- по результатам сопоставления значения параметра K_n со справочными данными для данного типа подшипника определяют вид, значение и ориентацию макроотклонения.

Достоинством данной методики является возможность управления долговечностью опоры качения по результатам выявления макроотклонений циркуляционно нагруженного кольца подшипника и выбора условий смазки опор качения электродвигателя.

Анализ экспериментальных данных

С целью опытной проверки работоспособности предложенного электрорезистивного метода мониторинга и заявленных возможностей методик оценки состояния опоры качения выполнены экспериментальные исследования. В отличие от известных результатов исследований [1, 5], особое внимание было уделено работоспособности метода в режиме жидкостной смазки, поэтому подшипник был смазан не трансформаторным маслом, формирующим режим смешанной смазки, а смазочными материалами, обеспечивающими прочную и неразрывную смазочную плёнку, при которой параметр НИВ неработоспособен: трансмиссионным маслом ТАД-17 и пластичным смазочным материалом Литол-24.

Объектом исследований являлась опора качения с подшипником типа 1000900. Опытная опора качения была установлена в экспериментальной установке [6], позволяющей моделировать макротоклонения колец подшипника в диапазоне значений от 0 до 50 мкм, задавать частоту вращения вала в диапазоне значений от 0 до 3000 об/мин, нормальную нагрузку в диапазоне значений от 0 до 500 Н при местном и циркуляционном нагружении колец подшипника В качестве средства измерений сопротивления опоры качения использовалась автоматизированная система сбора и анализа данных при трибомониторинге САДТ-1 [6].

С целью повышения достоверности опытных данных объект исследований тщательно готовился к проведению эксперимента – испытуемый подшипник промывался керосином, просушивался в течение 20 ч и прирабатывался в течение 2 ч. При проведении экспериментов задавались стабильные значения режимов работы опоры качения: значение нормальной нагрузки составляло 100 Н, объём смазочного материала варьировался в диапазоне от 8 до 40 мм³, частота вращения вала составляла 1500 об/мин при исследовании местно нагруженного кольца и 730 об/мин – для циркуляционно нагруженного кольца.

Экспериментальные данные подтвердили работоспособность электрорезистивного метода мониторинга и заявленных возможностей методик оценки состояния опоры качения.

На рисунке 1 показаны результаты оценки общего состояния подшипника в опоре качения по диагностическому параметру R_s .

На рисунке 1, а показаны зависимости параметра R_s от времени в процессе приработки подшипника. Зависимости N1 и N2 соответствуют новым подшипникам, а зависимость N3 – изношенному подшипнику в предельном состоянии. На рисунке 1, б показаны зависимости параметра R_s от типа смазочного материала и его количества. Видно, что значения параметра R_s существенно зависят от количества смазочного материала в подшипнике, и зависимости индивидуальны для каждого типа смазочного материала.

На рисунке 2 показаны результаты оценки макротоклонений деталей опоры качения с местным нагружением по диагностическому параметру R_s .

На рисунке 2, а показана зависимость параметра R_s от овальности местно нагруженного наружного кольца подшипника, смазанного полужидким трансмиссионным маслом ТАД-17. Из графика видно, что с увеличением значения овальности с 5 до 40 мкм значение среднего электрического сопротивления подшипника уменьшается с 0,65 до 0,45 МОм. Снижение электрического сопротивления подшипника при увеличении овальности свидетельствует о чувствительности параметра R_s к макротоклонениям колец подшипника, а относительно небольшой динамический диапазон изменения параметра R_s указывает на хорошие смазочные свойства полужидкого трансмиссионного масла.

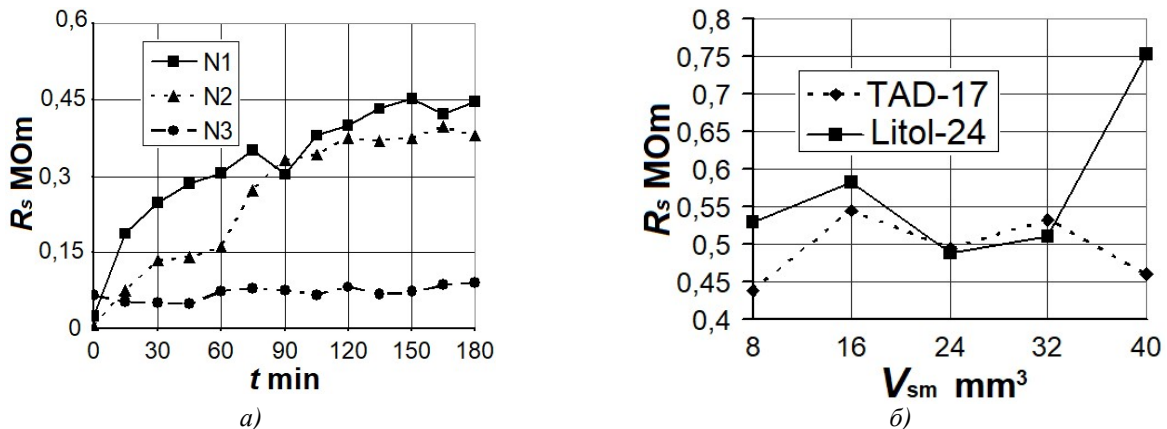


Рисунок 1 – Влияние режима работы и смазочного материала на параметр R_s
 а – влияние режима работы; б – влияние типа и количества смазочного материала

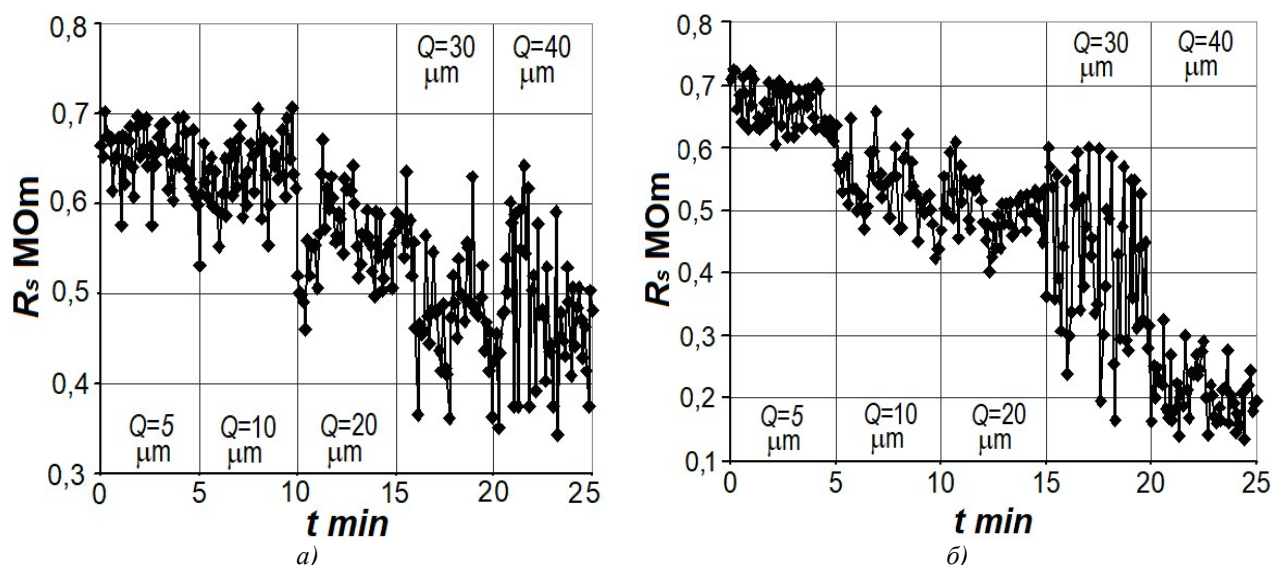


Рисунок 2 – Зависимость параметра R_s от овальности местно нагруженного кольца
 а – трансмиссионное масло ТАД-17; б – пластичный смазочный материал «Литол-24»

На рисунке 2, б показана зависимость параметра R_s от овальности местно нагруженного наружного кольца подшипника, смазанного пластичным смазочным материалом «Литол-24». Из графика видно, что с увеличением овальности с 5 до 40 мкм значение среднего сопротивления подшипника уменьшается с 0,7 до 0,2 МОм. При этом характер зависимости подтверждает чувствительность параметра R_s к макроотклонениям колец подшипника, а более широкий динамический диапазон изменения параметра R_s указывает на меньшую эффективность пластичного смазочного материала по сравнению с полужидким трансмиссионным маслом. Особого внимания заслуживает участок графика на рисунке 2, б с овальностью наружного кольца $Q = 30$ мкм. На данном участке отмечается значительный разброс значений параметра R_s , что указывает на резкое ухудшение режима смазки и на деградацию смазочных свойств материала при высоких нагрузках.

С целью подтверждения возможности определения вида макроотклонения местно нагруженного кольца подшипника (эксцентриситет, овальность, огранка) проведён гармонический анализ функции среднего сопротивления опоры качения от угла поворота вала – функции $R_s(\varphi)$. Результаты гармонического анализа представлены на рисунке 3.

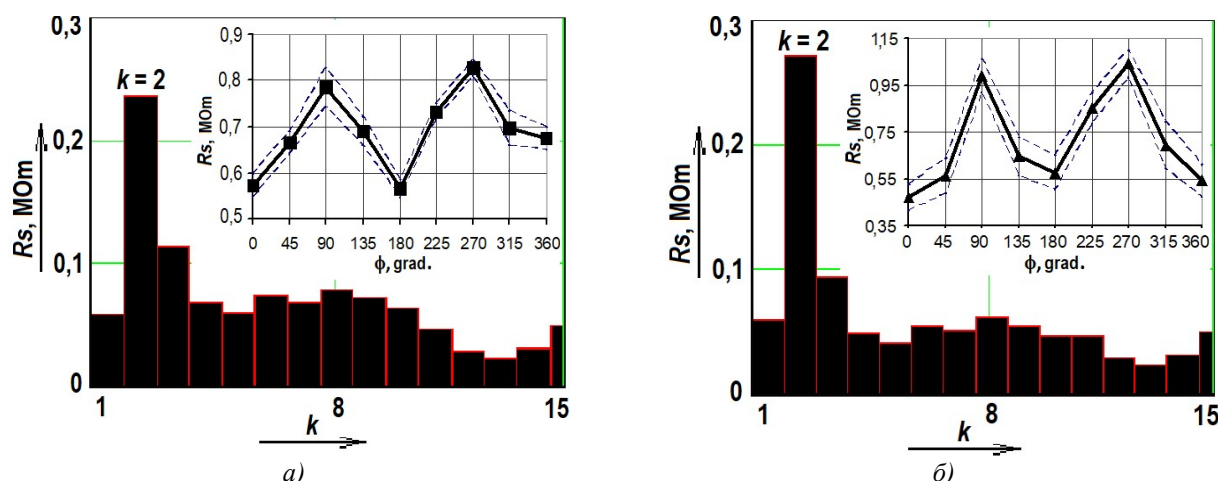


Рисунок 3 – Гармонический анализ функции $R_s(\varphi)$ для местно нагруженного кольца
 а – трансмиссионное масло ТАД-17; б – пластичный смазочный материал «Литол-24»

На рисунке 3, а показаны результаты гармонического анализа функции $R_s(\varphi)$ для местно нагруженного кольца подшипника, смазанного трансмиссионным маслом ТАД-17. На рисунке 3, б результаты гармонического анализа функции $R_s(\varphi)$ для местно нагруженного кольца подшипника, смазанного пластичным смазочным материалом «Литол-24». Спектры функции $R_s(\varphi)$ получены при моделировании овальности наружного кольца подшипника, равной $Q = 10$

мкм. Для двух типов смазочных материалов зависимости имеют ярко выраженную вторую гармонику функции $R_s(\varphi)$, соответствующую овальности кольца.

На рисунке 4 показаны результаты оценки макроотклонений деталей опоры качения с циркуляционным нагружением по диагностическому параметру K_n . При проведении эксперимента в опору качения был установлен подшипник типа 1000900 с количеством шариков – 7 шт. Для наружного кольца подшипника моделировалась овальность в диапазоне значений от 0 до 40 мкм с шагом 10 мкм. Внутреннее кольцо подшипника вращали с частотой 12,14 Гц (4500 об/мин), циркуляционное нагружение (100 Н) создавало устройство дисбаланса, вращающееся вместе с валом [7, 8].

На рисунке 4, а показаны результаты гармонического анализа временной функции электрического сопротивления $R(t)$ циркуляционно нагруженного кольца подшипника, смазанного трансмиссионным маслом ТАД-17. На рисунке 4, б показаны аналогичные результаты для подшипника, смазанного пластичным смазочным материалом «Литол-24». Оба спектра получены при овальности наружного кольца подшипника $Q_2 = 10$ мкм.

Спектры рисунков 4, а и б показывают наличие в функции $R(t)$ гармонических составляющих на информационных частотах, рассчитанных по блоку формул (9) и соответствующих овальности наружного кольца подшипника.

На рисунке 4, в показаны графики зависимости диагностического параметра K_n от овальности наружного кольца подшипника в диапазоне значений от 0 до 40 мкм с шагом 10 мкм. Наружное кольцо подшипника испытывало циркуляционное нагружение (100 Н) от устройства дисбаланса, вращающегося вместе с валом [7, 8]. Внутреннее кольцо подшипника вращалось с частотой 12,14 Гц (4500 об/мин). Зависимости получены для трансмиссионного масла ТАД-17 и пластичного смазочного материала «Литол-24».

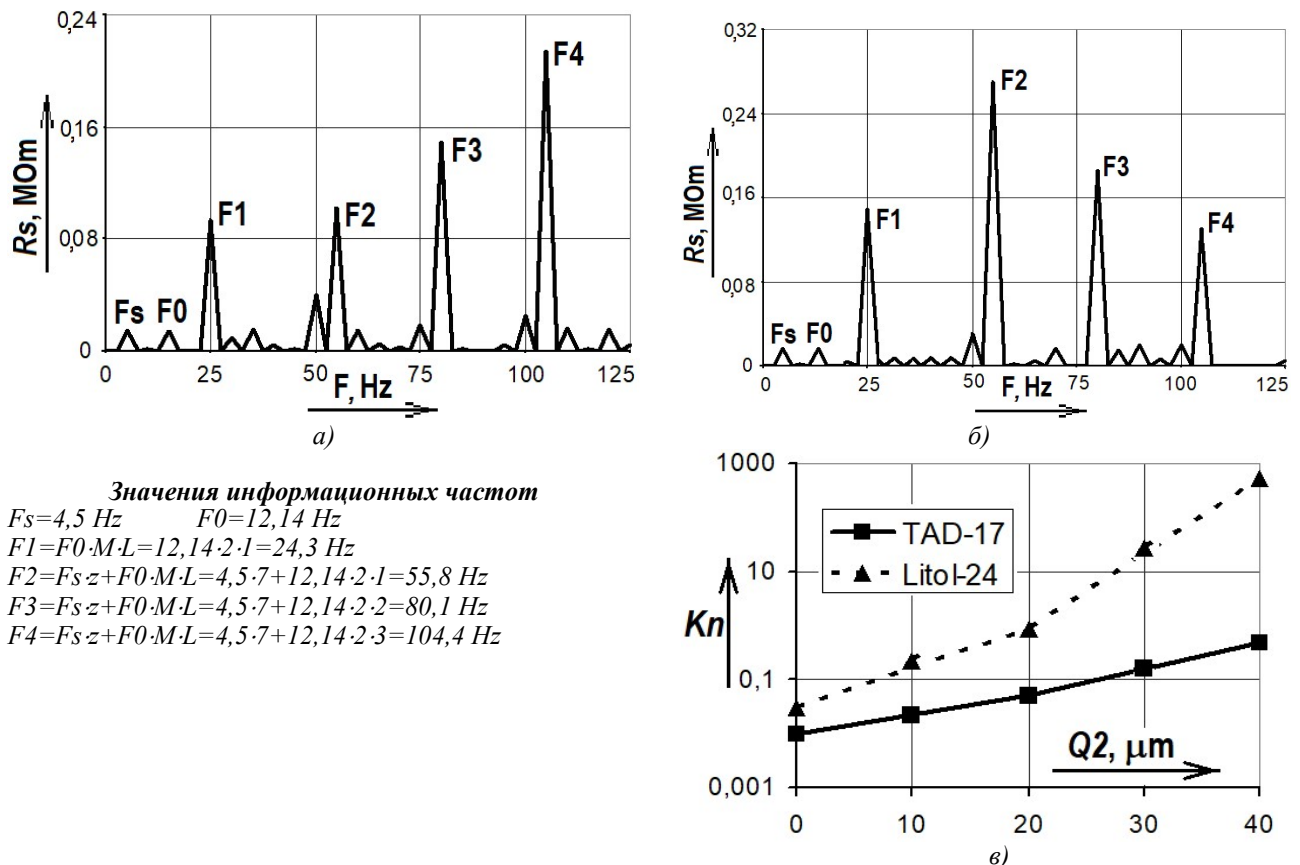


Рисунок 4 – Анализ функции сопротивления для циркуляционно нагруженного кольца
 а – трансмиссионное масло ТАД-17; б – пластичный смазочный материал «Литол-24»;
 в – зависимость параметра K_n от значений овальности Q_2 кольца подшипника

Экспериментальные зависимости, показанные на рисунке 4, в, подтверждают чувствительность диагностического параметра K_n к макроотклонениям кольца подшипника, испытывающего циркуляционное нагружение. Из графика видно также, что параметр K_n имеет относительно высокую чувствительность к значениям макроотклонений – не менее двух

порядков динамического диапазона значений, характер которых зависит от значения макроотклонения, а степень – от типа смазочного материала. Данные результаты подтверждают теоретическую возможность оценки макроотклонений деталей опоры качения с циркуляционным нагружением по диагностическому параметру K_n .

Установленный экспериментально монотонный характер исследуемых зависимостей показывает, что отклонения формы на дорожке качения циркуляционно нагруженного кольца приводят к однозначному ухудшению состояния смазки в подшипнике. Спектральный анализ ряда реализаций функции $R(t)$ при различных режимах работы подшипника и моделировании различных по виду и значению отклонений формы показал, что отклонения дорожки качения циркуляционно нагруженного кольца, наряду с изменением интегральных характеристик функции $R(t)$, вызывают формирование в её спектре информационных гармонических составляющих. При этом каждому виду отклонений формы соответствует характерный только для него набор информационных составляющих. Изменение значения отклонения формы лишь перераспределяет весомость различных составляющих, а их информационные частоты остаются неизменными.

Полученные результаты подтверждают достоверность проведенных теоретических исследований и работоспособность метода мониторинга опоры качения по параметрам электрического сопротивления подшипника, собранного в данной опоре.

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. Народецкий // 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

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

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

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

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

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.

Введение

Управление рисками представляет собой сложный многокритериальный процесс, направленный на предотвращение угроз и снижение их последствий. Для изучения этого процесса и принятия оптимального решения по способам предотвращения угроз и снижения их последствий необходимо данный процесс рассматривать с точки зрения эффективного функционирования сложной человеко-машинной системы с учетом неоднородностью ее всех составляющих, которые характеризуются стохастической неопределенностью.

Основная часть

Рассмотрим человеко-машинную систему (ЧМС), характеризующуюся неоднородностью её компонентов «Человек», «Электроустановка», «Среда» («Ч-Э-С») и стохастической неопределенностью [1]. Здесь решающая роль принадлежит индивидуальному или коллективному принятию решений (ПР), определяемому на основе тех или иных предпочтений, с учетом которых можно упорядочить решения и выбрать лучшее (оптимальное) из них (рисунок 1).

Сформулируем задачу разработки модели и алгоритмов принятия решения в ЧМС, включающую: а) анализ существующих методов многокритериального выбора решений; б) формирование критериев функционирования ЧМС (показателей эффективности); в) формализацию задачи ПР в виде представленной трехуровневой структуры.

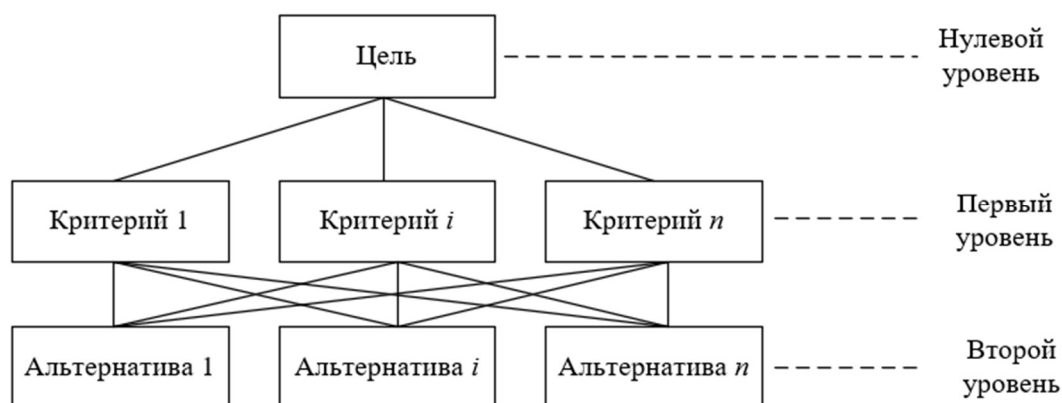


Рисунок 1 – Пример построения иерархической структуры «Ч-Э-С»

Рассмотрим основные модели принятия оптимальных решений:

1. Методы эмпирического исследования, включающие проведение специалистом интуитивно-логического анализа в сочетании с количественной оценкой и обработкой полученных результатов: применяются для решения не формализуемых задач, которые трудно поддаются количественной оценке.

2. Экспертные методы, представляющие собой прогнозирование изучаемого явления на основе обобщения мнений экспертов о развитии процесса в будущем (динамику изменения риска) с применением экстраполяционных методов, где в качестве исходной информации возможно использование временных рядов.

3. Методы многокритериального анализа, где оценка и сравнение альтернатив производится по нескольким критериям, когда необходимо учитывать некоторую группу необходимых параметров (рисунок 2).

Решение рассматриваемой задачи состоит в создании интерактивной процедуры многоуровневого анализа и выбора лучшей альтернативы на основе качественной информации, получаемой экспертным путём о предпочтениях ПР, с помощью метода парных сравнений. В основе этого метода лежит экспертное сравнение объектов и показателей в парах для определения предпочтительности с помощью сравнительного анализа и последующего синтеза [2]. Определение безразмерных приоритетов, представляющих относительную важность или предпочтительность подсистем и элементов построения структуры человеко-машинной системы, позволяет нам обоснованно сравнивать разнородные рискообразующие факторы. На заключительном этапе критерии альтернативных решений сравниваются, лучшей из которых является альтернатива с максимальным значением приоритета.



Рисунок 2 – Схема многокритериального анализа альтернатив

Рассмотрим метод анализа риска (MAR) как способ визуализации опасности электроустановок объекта.

Метод «галстук-бабочка». Исходные положения: опасность возникает в процессе функционирования компонентов и элементов человеко-машинной системы при условии, если действующие в техносфере потоки вещества, энергии и информации превышают пороговые (критические) значения [3].

Метод представляет собой схематическую процедуру описания и анализа пути развития опасной антропогенной ситуации (ОАС) от зарождения и идентификации её источников до возникновения негативных последствий. Метод сочетает исследование причин события с помощью дерева неисправностей (до возникновения ОАС) и анализ последствий с помощью дерева событий (после ОАС).

На рисунке 3 приведена диаграмма «галстук-бабочка» применительно к опасному событию «Пожар в электроустановке производственного объекта». Здесь «Блок причин» источник угроз и возникновения ОАС, вызванной: а) компонентом «Человек», учитывающим ошибочное действие электротехнического персонала и операторов, опыт работы, образования и др.; б) компонентом «Электроустановка» – возникновение отказов и аварий технического электрооборудования производственного быта; в) компонентом «Среда» – негативное воздействие факторов рабочей и внешней среды, инициирующие возникновения ОАС.

Каждая из рассматриваемых по компонентам ЧМС, составляющих «Блок причин» связаны соответственно с «Блоком последствий». Причём, в зависимости от ограждающих барьеров «Предупредительные меры» и «Меры предотвращения ОАС и снижения последствий» могут быть как позитивными, так и негативными, в зависимости от эффективности функционирования подсистем человеко-машинной системы «Ч-Э-С».



Рисунок 3 – Диаграмма «галстук-бабочка»

Будем рассматривать машинное моделирование как процесс построения математических или логико-лингвистических моделей предполагаемой или действующей человеко-машинной системы. По существу, такое моделирование представляет собой имитацию некоторой реальной или проектируемой системы. Имитационное моделирование позволяет проводить исследования, когда реальная система может быть недоступна по моральным или экологическим соображениям, например, при установлении критериев электробезопасности, оказывающих поражающее воздействие на человека, приводящее к летальному исходу. Нельзя также проводить эксперименты на действующих электроустановках, которые могут вызвать воспламенение и привести к пожару. Единственный выход – построить адекватную имитационную модель, исследовать ее работоспособность, обобщив и перенеся полученные результаты на реальную систему [4].

Для проведения машинных экспериментов необходимо иметь формализованное описание физических процессов, протекающих в реальных электроустановках, т.е. нужны модели, формализованные в виде математических, логических и семантических высказываниях. Построение такого рода моделей возможно, если: а) известны физические законы, управляющие системой; б) идентифицированы рискообразующие факторы; в) изменчивость входов, выходов и элементов системы поддаются контролю.

Отметим, что моделирование рассматриваемой ЧМС «Ч-Э-С» представляет значительную сложность в сравнении с физическими системами, описываемые фундаментальными законами. Объяснение этому – отсутствие единой методологии, сдерживающей проводить комплексный учет факторов возникновения опасностей компонентов различной природы человеко-машинной системы. Важность анализа такой

системы вызвана следующим: а) низкой структурированностью, неопределенностью, физической неоднородностью компонентов ЧМС; б) наличием многочисленных ограничений технологического, нормативного и экономического характера; в) имитирующими предпосылками, приводящими к возникновению антропогенных опасных ситуаций: ошибки человека (персонал, население) - человеческий фактор; г) отказами системы электроснабжения и электрооборудования - технологический фактор; д) негативные (сверхнормативные) воздействия факторов среды (С); е) недостаточностью исходных и текущих данных и отсутствием точного (удовлетворительного) описания возникновения и развития аварийных процессов, что делает невозможным принятие адекватных оценок. Неопределенность информации вызвана состоянием среды, обусловленной случайностью. Нечеткость является следствием субъективности процессов мышления человека, неясность объясняется многообразием семантики и структуры естественного языка.

В этой связи представляется перспективным оценивать исходную информацию, имеющую неясную, неопределенную и вероятностную природу на основе имитационного моделирования человеко-машинной системы, позволяющего снять многие ограничения и рассматривать имитацию опасных процессов в электроустановках как альтернативу экспериментально-опытной проверке. Имитация также представляет необходимую гибкость при построении различного вида моделей – от агрегированных (упрощенных) до высокой степени детализированных. Известно, что более 40% аварий и других техногенных угроз прямо или косвенно связано с человеческим фактором [5]. Поэтому оценка безопасности электроустановок без учета влияния персонала не является достоверной.

Значительная сложность современной человеко-машинной системы с участием человека-оператора приводит нас к целесообразности отказа от построения традиционных вероятностных моделей и привлечения соответствующего математического аппарата. По нашему мнению, весьма перспективным здесь представляется использование новых информационных технологий, так называемых «мягких вычислений», разработанных Л. Заде [6]. Сущность этого подхода в отличии от традиционных жестких вычислений, связанных с решением дифференциальных и интегральных уравнений, состоит в том, что «мягкие вычисления», по своей сути, можно отнести к технологиям приближенного решения, когда, например, антропогенную среду реальной электроустановки невозможно описать с помощью точных выражений. При этом возникает вопрос о соответствии приближенного и точного решения, т.е. речь идет об определении степени объективности.

Существует мнение, что классические модели физических процессов, описывающих, например, электромагнитное поле с помощью дифференциальных уравнений Максвелла, являются достаточно строгими и точными, а методы вычислительной математики представляются как приближенное решение этих уравнений. Однако, как показывает практика, при моделировании реальных объектов (электроустановок), зачастую, ставится более упрощенная задача только приближенного решения, вводя соответствующие допущения. В этом случае достаточно найти приближенное (мягкое) решение и исследовать объект без нахождения точного решения. Такой вывод подтверждается сформулированным Л. Заде принципом несовместимости: с ростом сложности объекта утрачивается возможность точного его описания и практической его надобности [7, 8]. В пользу использования аппарата мягких вычислений (МВ) говорит тот факт, что исходные данные, являющиеся основой для построения модели, всегда носят приближенный характер, т.к. они могут быть получены либо путем измерений (с неизбежной погрешностью), либо экспертно, т.е. субъективно. Процедура проведения МВ предполагает использование определенных математических инструментов, среди которых выбираются нечеткие множества (НМ) и нечеткую логику (НЛ) для приближенного описания слабоструктурированной человеко-машинной системы [9, 10].

Рассмотрим алгоритм построения имитационной модели человеко-машинной системы «Ч-Э-С». Процесс разработки ИМ может включать следующие этапы.

1. Постановка задачи. Здесь формулируется цель разработки, структурные неопределенности, которые необходимо разрешить, и способ оценки эффективности системы, позволяющий сравнивать альтернативные варианты.

2. Построение модели – заложен принцип конструирования человеко-машинной системы с помощью логико-математических и нечетко-лингвистических структурных соотношений.

3. Сбор данных – формирование базы данных. Предполагается выполнение идентификации источников опасности, спецификацию и получения необходимых данных (оценка частоты-вероятности этапов и переходов на альтернативные пути реализации цели и т.п.).

4. Трансляция ИМ – направлена к машинной реализации в соответствии с правилами выбранного языка моделирования.

5. Верификация – осуществляется с целью проверки правильности работы алгоритмического и программного обеспечения.

6. Проверка адекватности модели осуществляется с целью установления соответствия между имитационной моделью и реальной системой.

7. Экспериментирование, целью которого является осуществление прогона моделирующей программы и получение выходных результатов.

8. Анализ результатов и использование имитационной модели с целью оценки и прогнозирования антропогенного риска человеко-машинной системы и ее компонентов, в частности, определения остаточного ресурса электроустановок производственного объекта.

Рисунок 4 иллюстрирует концепцию имитационного моделирования рассматриваемой в работе слабоструктурированной ЧМС «Ч-Э-С».

Таким образом, эксперименты с имитационными моделями имеют целью выяснение влияния рискообразующих факторов на величину приемлемого (нормативного) значения интегрального риска R_{Σ} опасности электроустановки, что позволяет сделать выбор среди множества альтернативных решений.



Рисунок 4 – Принципы построения имитационного моделирования

К основным свойствам имитационной модели отнесем: а) возможность использования всей доступной информации вне зависимости от форм ее представления и степени формализации; б) понимание физических процессов, происходящих в электроустановках производственного объекта в реальном масштабе времени; в) получения адекватного решения функционирования ЧМС «Ч-Э-С» с помощью лингвистических моделей и экспертных систем.

Заключение

Разработанный метод многокритериальной оценки и управления техногенными рисками опасности электроустановок был реализован путем создания экспертной системы, позволяющей в условиях информационной неопределенности установить причинно-следственные связи между инициирующими событиями (рискообразующими факторами), приводящими к возникновению опасных последствий, и его последствий в виде моральных потерь (гибель людей) и материальным, и экологическим ущербам.

Механизм формирования антропогенного риска может быть представлен в виде имитационной модели взаимодействия компонентов ЧМС (персонала, электроустановки и

производственной среды), между которыми с помощью нейронных сетей устанавливаются информационные и энергетические связи.

Разработанный экспертно-программный комплекс явился основой создания интеллектуальной системы принятия решений в рассматриваемой предметной области.

По результатам выполненных исследований представлены методические рекомендации «Оценка и управление пожарными рисками опасности электроустановок на предприятиях АПК», принятых Минсельхозом и Главным управлением МЧС по Алтайскому краю для практического использования.

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. Кукур // 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

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

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

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

SURINSKY

MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC HAZARD RISK OF ELECTRICAL INSTALLATIONS BASED ON SIMULATION MODELING

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, simulation 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., Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Modeli otsenki faktora vremeni v teorii tekhnogennogo riska dinamicheskikh sistem / I.I. Muravyov, V.A. Ostreykovskiy, 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

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

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

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

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.

Введение

Важность и своевременность разработки эффективных мер предотвращения антропогенных ситуаций, приводящих к авариям систем электроснабжения, электротравматизму персонала, пожарам и электромагнитным излучениям, обусловлены возрастанием рисков при эксплуатации электроустановок 220/380 В на производственных объектах и инфраструктуры сельских поселений. Среднегодовой рост социальных потерь и материальных ущербов в настоящее время составляет более 20%. За последние два десятилетия в России от ОАС пострадало около 10 млн. человек, из них за этот период погибло 600 тыс. чел. Суммарный материальный ущерб сопоставим со средним валовым внутренним продуктом в РФ [1].

Накопленный опыт показывает, что наиболее эффективным способом снижения антропогенных опасностей является их предупреждение, основу которого составляют мониторинг, прогнозирование, управление и оптимизация рисков. Вместе с тем, отсутствие эффективной системы сбора и обобщения данных о неблагоприятных рисках образующих факторах, их идентификации, сдерживает оперативное принятие управленческих решений, направленных на предотвращение возникновения ЧС.

Известно, что многие практические задачи связаны с поиском управляющих воздействий, обеспечивающих наилучшее значение показателя, характеризующего эффективность функционирования объекта. Все это в равной степени относится к человеко-машинной системе «Человек-Электроустановка-Среда» «Ч-Э-С» [2, 3].

Проблемная ситуация состоит в том, что в условиях сельскохозяйственного производства и инфраструктуры села, с одной стороны, существует необходимость проведения диагностирования технического состояния электроустановок для снижения возникновения чрезвычайных ситуаций и их последствий, а, с другой, - имеющиеся знания о механизмах зарождения и идентификации антропогенных рисков в условиях неопределенности исходных и текущих данных и отсутствия необходимой методической базы, не позволяют в настоящее время создать эффективную и экономически целесообразную систему обеспечения комплексной безопасности электроустановок в сельском хозяйстве.

Актуальность данной работы подтверждена Стратегией социально-экономического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации (научных основ), в которой отмечается, что одним из приоритетных направлений поддержки сельскохозяйственного производства является «преодоление производственных рисков» [4].

Работа выполнялась в соответствии с долгосрочной целевой программой — Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения агропромышленного комплекса до 2025 года (Министерства сельского хозяйства РФ, приказ от 25 июля 2007 г. N 342), Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. N 966, в рамках научно-исследовательской работы по теме: «Разработка математической модели и направлений в области науки о рисках, повышения устойчивости технических систем и объектов снижения техногенного воздействия на окружающую среду».

Однако при всей значимости выполненных исследований ряд аспектов данной проблемы недостаточно изучен. В частности, отсутствует теоретическое обоснование метода поддержки принятия решений для оценки, прогнозирования и управления антропогенными рисками опасности электроустановок в условиях стохастической неопределенности. Поэтому проблема низкого уровня безопасности и эксплуатации электроустановок, связанная с отсутствием методического обоснования комплексной оценки состояния технологического

электрооборудования и электрических сетей 0,4 кВ (электропроводки), остается важной и востребованной [5].

Основная часть

Целью представленного исследования является обеспечение надежности и безопасности электроустановок на основе разработки интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей автоматизировать процессы диагностирования технического состояния электрооборудования.

Основная идея представленной статьи состоит в необходимости анализа возникновения и роста угроз аварий, электротравматизма людей и электропожаров.

В высокоразвитых странах базовым показателем аварийной опасности являются моральные потери, связанные с гибелью и инвалидностью людей, а также материальный и экологический ущерб по причине износа и снижения ресурса технологического электрооборудования. При этом существенным является негативное влияние человеческого фактора, вызванного ошибочными и неправильными действиями электротехнического персонала [6].

Оценка состояния проблемы антропогенной безопасности и надежности электроустановок, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственного производства, показала, что в настоящее время не уделяется должного внимания диагностированию и контролю параметров и режимов работы технологического оборудования, систем электроснабжения внутренних сетей (электропроводок). Сложившаяся негативная обстановка в аграрной отрасли привела к критическому износу основных фондов (более 70%). Добавим к этому отсутствие эффективных методов контроля и современных средств защиты, что обусловило устойчивую тенденцию увеличения опасных антропогенных ситуаций, приводящих к возникновению аварий, электротравматизму, пожаров, ухудшению экологической обстановки: ежегодный прирост материального ущерба от антропогенных происшествий достигает до 2% от ВВП страны. Таким образом, угрозы антропогенного характера в виде крупных аварий, гибели людей, пожаров и электромагнитного загрязнения оказывают все более заметное влияние на социально-экономическое развитие и безопасность страны.

Нами рассмотрены основные направления обеспечения антропогенной безопасности системы «Человек-Электроустановка-Среда» [6]. Представлена схема онтологии проблематики антропогенной безопасности, как некая специфическая база знаний, в основе которой лежат определение и использование взаимосвязанной совокупности таксономии терминов, их смыслового определения и установления соотношения между собой. Разработка информационных систем по поддержке принятия решений на основе онтологического анализа, включающего терминологическо-понятийный аппарат и концептуализацию знаний, математические экспертные и расчетные процедуры, представляется современной.

Проведено онтологическое проектирование антропогенной безопасности, основу которого составляет: а) математическая модель, отражающая в формализованном виде основные свойства и закономерности причинно-следственных связей с учетом наличия возможной неопределенности; б) обобщенная модель человеко-машинная система «Ч-Э-С», обеспечивающая решение задач идентификации, прогнозирования и оптимизации антропогенных рисков электроустановок объекта [7].

Эффективное управление антропогенными угрозами представляет собой сложную социально-экономическую проблему, связанную с поиском новых нетрадиционных подходов к решению задачи оптимизации антропогенных рисков, при этом предупреждающие как самих опасностей, так и минимизации их последствий.

На основании проведенного анализа антропогенной обстановки в Алтайском крае и Тюменской области следует, что сложившаяся ситуация представляет угрозу национальной безопасности страны, что вызвало необходимость включения данной проблемы в Перечень критических технологий Российской Федерации, утвержденных Президентом РФ в 2006 г.

Таким образом, назрела необходимость в разработке новых интеллектуальных подходов, в частности, создания экспертных систем многокритериального анализа, позволяющих осуществить выбор эффективных и экономически целесообразных систем антропогенной безопасности электроустановок [8, 9].

Рассмотрена процедура управления антропогенной безопасностью системы «Человек – Электроустановка – Среда» (рисунок 1).

Здесь представлены основы онтологии проблематики антропогенной безопасности как некая специфическая база знаний, учитывающая использование взаимосвязанной

совокупности таксономических терминов, их смысловое определение и установление соотношения между собой.

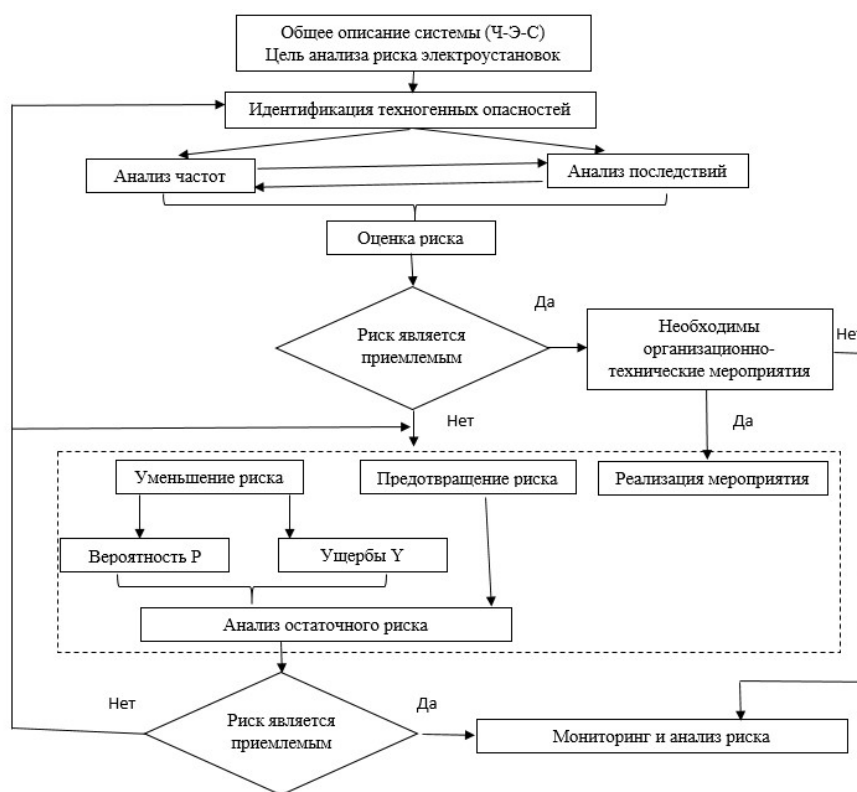


Рисунок 1 – Алгоритм анализа и управления рисками опасности электроустановок производственного объекта

Формирование нового направления инженерии знаний, в задачу которого входит анализ и разработка программ, использующих знания и процедуры вывода для решения задач, являющихся трудными для людей-экспертов. Здесь перспективными являются «системы принятия решений», «экспертные системы», «системы извлечения знаний» и т.д. Основной целью использования этих продуктов является проведение научных и прикладных работ, обеспечивающих повышение эффективности экспертной оценки процессов управления и контроля технологическими объектами АПК.

Нами рассмотрены основные принципы построения интеллектуальных систем при оценке антропогенных рисков эксплуатации электроустановок в условиях стохастической неопределенности и нестационарности объекта управления. Представлена концепция принятия решений, где особое место отводится так называемым гибридным системам или «системам, основанным на знаниях», «системам поддержки принятия решений». Рассмотрены основные этапы проектирования систем поддержки принятия решений (СППР), сводящихся к следующему: формализация языка описания объекта предметной области [Пр (О)], извлечение знаний из эмпирических данных путем измерений параметров электроустановки либо экспертных оценок; формализации экспертных знаний; интерпретации правил заключений; создании программно-аппаратного инструментария для решения конкретных задач предметной области [10].

В настоящее время приоритетным становится создание интеллектуальных систем диагностического типа, где требуется разработка СППР, адекватно отражающей динамические особенности предметной области, обрабатывающей нечетко-динамические знания. В слабоструктурированных Пр (О), какой является ЧМС, процессы формирования знаний опираются на опыт, интуицию и знания экспертов. Поэтому одним из основных источников приобретения знаний для построения базы знаний (БЗ), являются знания, полученные непосредственно от экспертов в данной Пр (О), либо знания, выведенные на основе механизмов обучения. При разработке БЗ важную роль должны играть качественные и нечетко-логические методы анализа слабоформализованных объектов ЧМС, что обусловлено отсутствием точного описания количественными методами и использование содержательного

списания с помощью проведения нечетко-логического анализа, позволяющего наиболее естественным образом моделировать расхождения экспертов.

Нами проведены формализация и алгоритмизация модели, устанавливающие и реализующие наличие связей между рискообразующими факторами, являющимися входными параметрами слабоструктурированной динамической ЧМС «Ч-Э-С» и уровнем антропогенного риска, представляющим собой критерий - количественный показатель оценки технического состояния электроустановок сельскохозяйственного объекта. Этот критерий является выходным (результатирующим) параметров ЧМС и в зависимости от постановки задачи может быть выражен в виде допустимого (приемлемого) значения антропогенного риска (например, 1×10^{-4}) или нормативного его значения (1×10^{-6}) [11].

В соответствии с Методическими указаниями по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01) антропогенный риск будем рассматривать как некоторую интегральную характеристику угрозы безопасности человеко-машинной системы, отражающую соответственно величину материальных потерь (гибель человека) и экономического ущерба. Определение угрозы безопасности через ущерб позволяет построить полную непротиворечивую онтологию проблематики антропогенной безопасности применительно к решению задачи эксплуатации электроустановок на объектах аграрной отрасли.

Интеллектуальная система ППР для контроля и управления рисками человеко-машинной системы «Ч-Э-С» с компонентами различной физической природы представляет собой экспертную систему (ЭС), сущность которой состоит в реализации накопленного опыта эксперта, полученного на знаниях, т.е. ЭС моделирует действия эксперта с помощью аппарата нечеткой логики (fuzzy logic). Такая система может быть описана с помощью комбинированного метода, сочетающего строгие математические модели поиска решений с приближенными эвристическими (логико-лингвистическими) методами, базирующимися на знаниях и опыте специалистов-экспертов [12].

Особенностью анализа рассматриваемой в статье человеко-машинной системы являются: а) невозможность получения всей объективной информации, необходимой для решения и, в связи с этим, использования экспертных данных; б) необходимость получения решения в условиях временных ограничений, определяемых управлением реальным процессом эксплуатации электроустановок на объекте; в) многовариативность задачи, обуславливающая необходимость применения правдоподобного (нечеткого) поиска решения и активного участия в нем ЛПР (лица, принимающего решения), позволяющего обеспечить штатный (нормальный) режим функционирования объекта. В ряде случаев для учета динамики протекающих процессов можно рекомендовать темпоральные логики, обладающие большими выразительными возможностями по представлению реального времени, чем системы на основе моделирования изменений (ситуационный анализ).

Сформулированы основные требования и предложена структурно-функциональная схема экспертно-программного комплекса рассматриваемой человеко-машинной системы (рисунок 2), позволяющая провести анализ из множества рассмотренных вариантов и выбор мер, направленных на повышение диагностирования состояния электроустановок и прогнозирования опасных антропогенных ситуаций. Нами выявлены функции ЛПР, участвующего в технологическом процессе и несущего ответственность за окончательный выбор одного из возможных вариантов действий по устранению проблемы техногенной опасности электроустановок на производственном объекте. Результатом выполнения исследования явилось создание лингвистической модели представления исходных данных и знаний [13, 14].

Развитие теории проектирования интеллектуальных систем, основанных на знаниях, привело к созданию систем поддержки принятия решений (СППР), позволяющих: а) провести формализацию языка описания Пр (О) — технического диагностирования электроустановок на основе анализа человеко-машинной системы «Ч-Э-С»; б) извлекать данные, полученные из эмпирических оценок; в) формализовать экспертные знания; г) интерпретировать правила заключений и выводы.

Рассмотрена концепция построения интеллектуальной автоматизированной СПИР в области обеспечения безопасности электроустановок. Сложившиеся условия рабочей среды обусловлены тем, что основная часть опасных антропогенных ситуаций вызвана ошибочными и неквалифицированными действиями персонала, обслуживающего электроустановки, при этом выступающего в триединой роли – как источник возникновения опасности, ее жертва и

ограничитель, предотвращающий опасность на основе создания барьеров, препятствующих возникновению и реализации рисков.

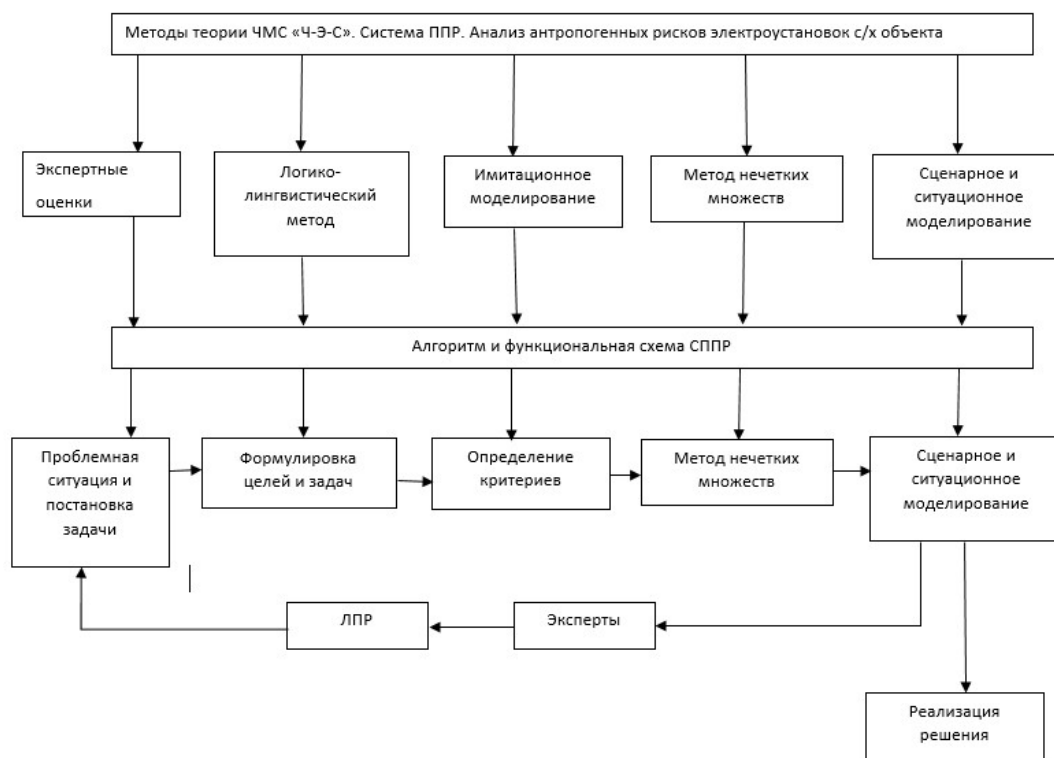


Рисунок 2 – Экспертно-программный комплекс слабоструктурированной человеко-машинной системы

Процесс построения модели принятия решения предполагает структурирование информации Пр (О) на основе агрегирования, включающее классификацию и кластеризацию (объединение или разделение элементов по признакам) полученных данных. Здесь нечеткость отображается качественно-количественными характеристиками человеко-машинной системы в терминах естественного языка.

Пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество признаков, значениями которых описывается состояние электроустановки в процессе ее эксплуатации. Кроме того, признак y_i ($i=1,2,\dots, n$) описывается соответствующей лингвистической переменной $ЛПу_i < y_i, T_i, Y_j >$, где $T_i = \{t_1^i, t_2^i, \dots, t_m^i\}$ — терм-множество $ЛПу_i$ (набор лингвистических значений признаков, m_i число значений признака), Y_i — базовое значение признака, Y_i - для описания термов t_j^i ($j = 1, 2, \dots, m_i$) используются нечеткие переменные $< t_j^i, Y_i, C_j^i >$, т.е. значение t_j^i описывается нечетким множеством C_j^i в базовом множестве Y_i ; $C_j^i = \{ \langle m_i(y)/y \rangle \in Y_i$.

Таким образом, нечеткую ситуацию \bar{S} можно представить в виде вектора нечетких множеств:

$$\bar{S} = \left\{ \left\langle \frac{M_s(y_i)}{y_i} \right\rangle, y_i \in Y, \text{ где } M_s(y_i) = \left\{ M_s(y_i) \left(\frac{t_j^i}{t_j^i} \right) \right\} \right\}. \quad (1)$$

Представление ситуации посредством выражения (1) позволяет снизить трудоемкость на этапах процедуры кластеризации методом К-средних, основанным на минимизации суммы квадратов расстояний между каждой из электроустановок и центром ее кластера.

Разработанная модель принятия решений на основе представления и обработки экспертных знаний и нечеткого распознавания антропогенной ситуации была использована для решения практической задачи управления рисками опасности электроустановок на сельскохозяйственном предприятии Тюменской области. Проведенные расчеты подтвердили реализуемость предложенной модели ПР.

В работе рассматривается модель интеллектуальной СППР применительно к неформализованной предметной области, обеспечивающей концептуальную, информационную и методическую основу, в том числе дескрипционную логику, позволяющую описывать понятия (онтологию) предметной области в формализованном нечетком виде (fuzzy logic). Рассматриваемая СППР представляет собой инструмент

реализации ЧМС «Ч-Э-С», которая позволяет ЛПР использовать имеющиеся базу данных и базу знаний, содержащие объективные и субъективные механизмы для решения слабоструктурированной задачи [14, 15].

Разработка ИС ППР предполагает обоснование архитектуры и алгоритма, задающей последовательность действия, включающих онтологии и этапы идентификации рискообразующих факторов, формализацию, реализацию, тестирование и опытную эксплуатацию (рисунок 3).

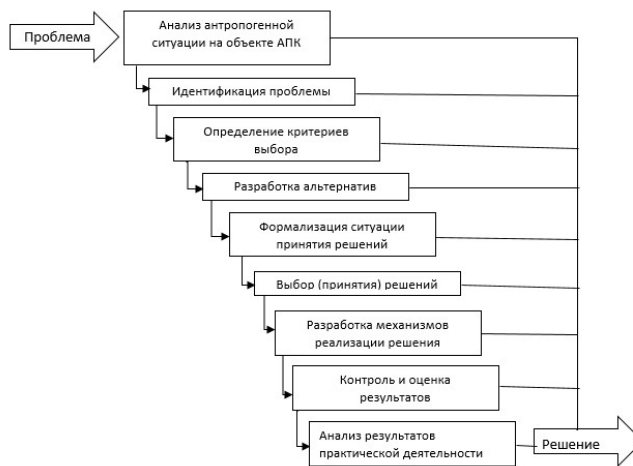


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма принятия решений

Заключение

На основании анализа современного состояния проблемы надежности и безопасности технологического электрооборудования и систем электроснабжения установлено, что в настоящее время не уделяется должное внимание их диагностированию и контролю параметров и режимов работы, что привело к критическому износу основных фондов (более 70 %), обусловило устойчивую тенденцию увеличения угроз возникновения отказов и аварий ЭУ, электротравматизма людей, пожаров и ухудшению экологической обстановки в аграрной отрасли. Так, ежегодный рост материального ущерба от антропогенных происшествий достигает до 2% от ВВП страны.

Предложено новое решение актуальной научно-технической задачи обеспечения условий антропогенной безопасности на основе концепции человеко-машинной системы (ЧМС «Ч-Э-С»), позволяющей сформулировать основные принципы построения аппаратного инструментария для решения конкретных задач предметной области.

Показано, что в слабоструктурированных Пр (О) (ЧМС «Ч-Э-С») процесс формирования знаний опираются на опыт и интуицию экспертов. Поэтому при разработке БЗ важную роль должны играть качественные и нечетко-логические методы анализа, что обуславливается отсутствием точного описания количественными методами и использованием содержательного описания, позволяющего наиболее естественным образом моделировать рассуждения экспертов.

Обоснована концепция человеко-машинной системы как эргономическая иерархия сложной слабоструктурированной системы включающей: а) человека (электротехнический персонал, ЛПР); б) средства производственной деятельности (электроустановки, электрооборудование, система электроснабжения; в) среду (рабочую и внешнюю). Под воздействием факторов среды, ЧМС, обладая адаптационными свойствами, может менять свою структуру и функциональные признаки. В этом случае используются интеллектуальные системы поддержки принятия решений (СППР) при оценке антропогенных рисков эксплуатации электроустановок в условиях стохастической неопределенности.

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 // MATEC 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

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

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

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 uchet, otsenka, 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. 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.
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 elektromagnetoi kompatenii: uchebnik [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

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

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

© Л.В. Куликова, О.К. Никольский, Т.М. Халина, В.В. Фараносов, 2024

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.

Введение

Технология вакуумно-диэлектрической сушки древесины представляет собой совместное использование следующих известных и хорошо зарекомендовавших себя на практике способов сушки древесины, а именно, высокочастотного нагрева и сушки древесины в вакууме. Известно, что при снижении давления в рабочей камере установки вода начинает кипеть при более низких температурах нагрева древесины, чем при атмосферном давлении (100 °С) [1-2]. Данный способ сушки пиломатериалов широко используется в деревообрабатывающей промышленности и мебельном производстве, т.к. он обеспечивает высокие скорости удаления избыточной влаги из древесины и, как следствие, позволяет сократить продолжительность ее сушки по сравнению с сушкой по классической технологии – в паровых камерах [3]. Известно, что процесс удаления влаги из древесины зависит от следующих факторов: процентного содержания влаги и породы древесины; параметров электрического поля в рабочей камере ВДК; диэлектрических свойств вакуума и высушиваемого материала (ϵ_0 и ϵ), а также коэффициента диэлектрических потерь древесины ($tg\delta$) [4]. Вместе с тем, движение влаги в высушиваемой древесине зависит от её проницаемости, градиента внутреннего давления и других факторов. Установлено, что чем больше значение относительной диэлектрической постоянной и коэффициента диэлектрических потерь древесины, тем выше скорость удаления влаги из неё [5]:

$$P = E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot tg\delta, \quad [\text{Вт/м}^3] \quad (1)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м,

ω – круговая частота, рад/с.

Из ретроспективного анализа сушильных камер, эксплуатируемых как в России, так и за рубежом установлено, что среднестатистическая ВДК с геометрическими размерами 8x3x3 м (длина x высота x ширина) обеспечивает сушку штабеля пиломатериалов объемом до 10 м³ за время от 10 до 25 часов. Тогда как при классическом способе сушки в паровых камерах этот показатель составляет от 20 до 25 суток [6]. Для исключения возникновения явления стоячих волн в ВДК мощный радиочастотный генератор, работающий в коротковолновом (например, 13,56 МГц) рекомендуется размещать над вакуумной камерой, а избыточную влагу, выделяющуюся из древесины в виде водяного пара, принято конденсировать на водоохлаждаемых стенках сушильной камеры или на водоохлаждаемых регистрах, расположенных внутри камеры [7]. Отмеченные технические решения влияют на общую продолжительность времени сушки древесины.

Все известные факторы, влияющие на технологический процесс высокочастотной сушки, можно разделить на две группы. В первую группированы факторы, содержащие сведения об уровне напряжения питающей сети, установленной мощности ВЧ-генератора,

давлении в рабочей камере и об геометрических размерах высушиваемых досок и штабеле. Во вторую группу вошли количественно оцениваемые факторы, которые характеризуют древесину в начале и в конце процесса сушки – это процентное содержание в ней влаги и значения диэлектрической проницаемости [8]. Как показали проведенные теоретические и экспериментальные исследования каждый из указанных выше факторов, а также возможные варианты их комбинаций оказывают влияние на продолжительность цикла сушки.

В диэлектрическом материале, размещенном в электрическом поле высокой частоты, наблюдается процесс преобразования электрической энергии в тепловую [9]. О характере распределения тепловой энергии по сечению штабеля древесины можно судить по картине распределения температурного поля [10]. Наличие информации о значениях температуры в разных точках сечения штабеля позволяет оценить градиенты температур, а, следовательно, определить и ожидаемое направление распространения теплоты путем построения нормалей к изотермическим линиям, полученным в результате математического или компьютерного моделирования. Кроме того, по величине градиента можно судить о скорости изменения температуры для любой точки поперечного сечения штабеля древесины и определять области перегрева древесины.

Известно, что изменения температуры и влажности влияют на протекание химических реакций в высушиваемой древесине, которые в свою очередь приводят к изменению внутренних механических напряжений, деформации, а иногда и к растрескиванию или разрушению древесины [11]. Для изучения указанных выше нежелательных процессов требуется проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований вакуумно-диэлектрического способа сушки. Для дальнейшего повышения эффективности процесса сушки древесины в ВДК необходимо выявить и установить закономерности влияния неравномерного характера распределения электромагнитного и теплового полей на процесс сушки древесины при обеспечении заданной категорией её качества.

Основная часть

На первом этапе экспериментальных исследований было принято решение выявить влияние частоты тока ВЧ-генератора и величины воздушного зазора между рабочими электродами и боковыми стенками штабеля древесины на процесс сушки.

В качестве объекта исследования рассмотрена ВДК для сушки досок из дуба со следующими стандартными размерами 40x150x6000 мм (толщина x ширина x длина). Расчетно-графическая модель ВДК была разработана для исследования процесса сушки в программной среде ELCUT для ряда стандартных частот (3; 6,78; 13,56; 27,12; 40,68 и 50 МГц), на которых работают ВЧ-генераторы отечественных и зарубежных производителей. Исследуемый штабель был сформирован из 25-горизонтальных рядов дубовых досок, нумерация которых идет вверх от первого ряда, размещенного на выкатной тележке и восьми вертикальных рядов.

Результаты моделирования представлены в виде картин распределения напряженности электрического поля в системе «ВДК – штабель древесины» на рисунках 1 – 6, из анализа которых можно сделать следующие промежуточные выводы:

1. Качественно характер распределения E в исследуемой системе для всех частот одинаков, а количественно это распределение зависит от частоты тока источника питания ВДК. Установлено, что с увеличением частоты тока ВЧ-генератора увеличивается неравномерность распределения электрического поля по сечению штабеля.

2. Максимальная неравномерность распределения E наблюдается на уровне 25-го ряда досок штабеля, причем два максимума напряженности приходятся на первую и восьмую вертикальные колонки по горизонтали. Напряженность в центре штабеля на уровне рассматриваемого ряда на 20% меньше чем по краям. Установлено также, что напряженность электрического поля в рядах, расположенных ниже 25-го ряда вначале убывает на 13% (уровень 12-го ряда досок), а затем начинает плавно увеличиваться и достигает значения 91% (уровень 1-го ряда досок) от максимального значения E в верхнем ряду штабеля.

3. Анализ показал, что по горизонтальной и вертикальной оси поперечного сечения штабеля наблюдается неравномерное распределение напряженности электрического и температурного полей в пределах от 9 до 20%. Полученную неравномерность можно

устранить путем применения осциллирующего режима сушки древесины обеспечивающего выравнивание градиентов температур за счет процесса теплопередачи.

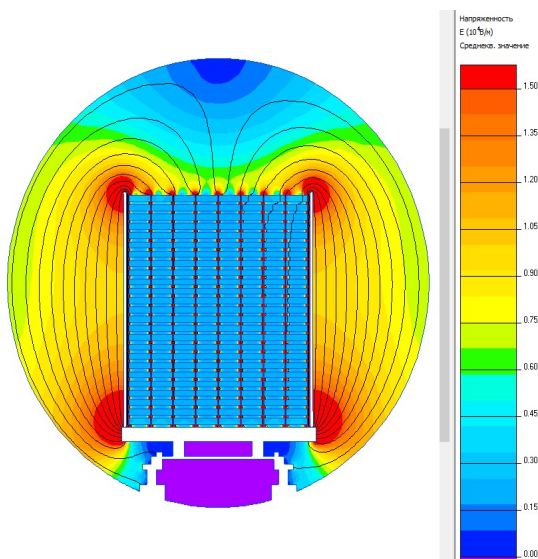


Рисунок 1 – Картина распределения напряженности $E = f(f)$, при $f = 3$ МГц

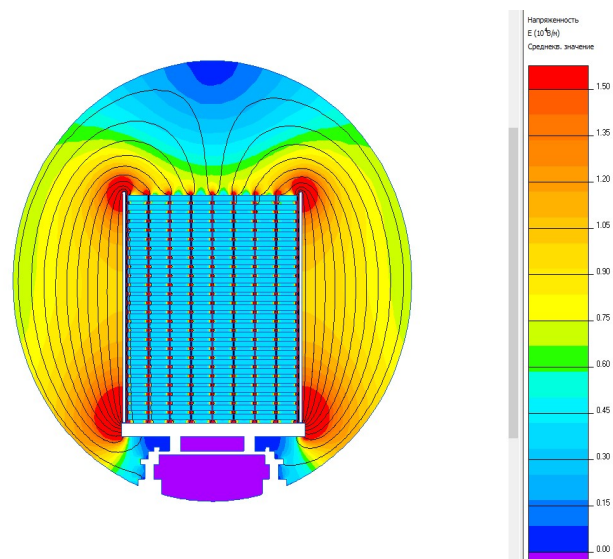


Рисунок 2 – Картина распределения напряженности $E = f(f)$, при $f = 6,78$ МГц

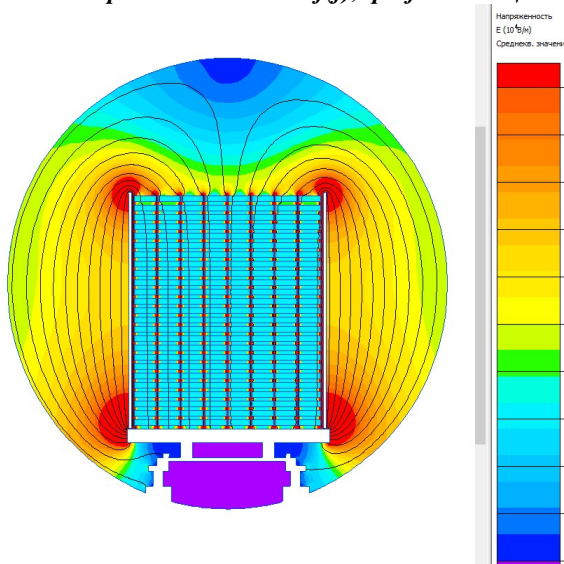


Рисунок 3 – Картина распределения напряженности $E = f(f)$, при $f = 13,56$ МГц

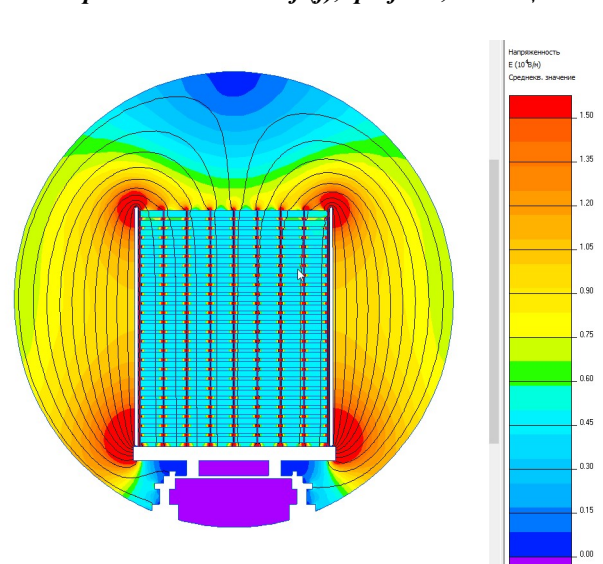


Рисунок 4 – Картина распределения напряженности $E = f(f)$, при $f = 27,12$ МГц

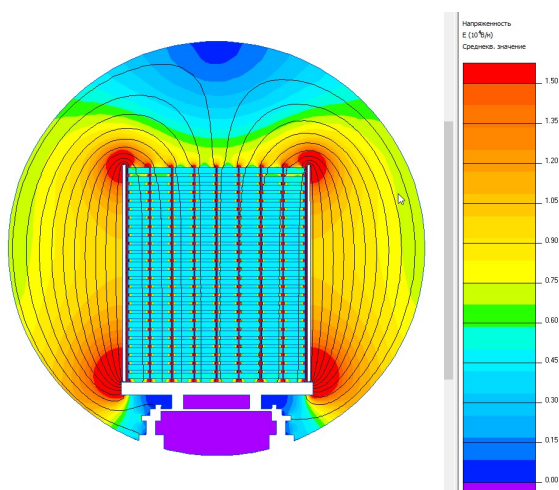


Рисунок 5 – Картина распределения напряженности $E = f(f)$, при $f = 40,68$ МГц

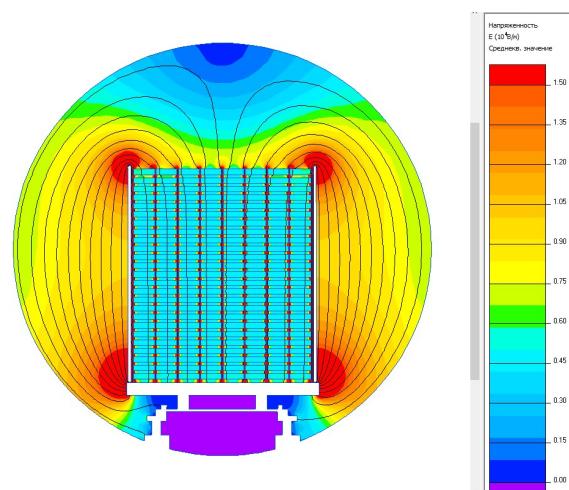


Рисунок 6 – Картина распределения напряженности $E = f(f)$, при $f = 50$ МГц

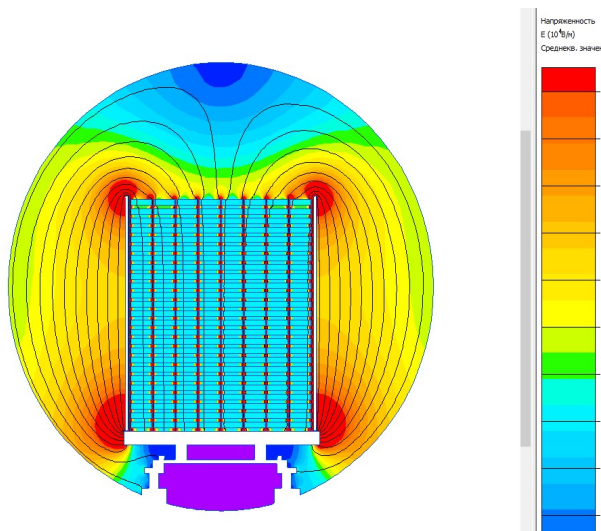


Рисунок 7 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 2$ см

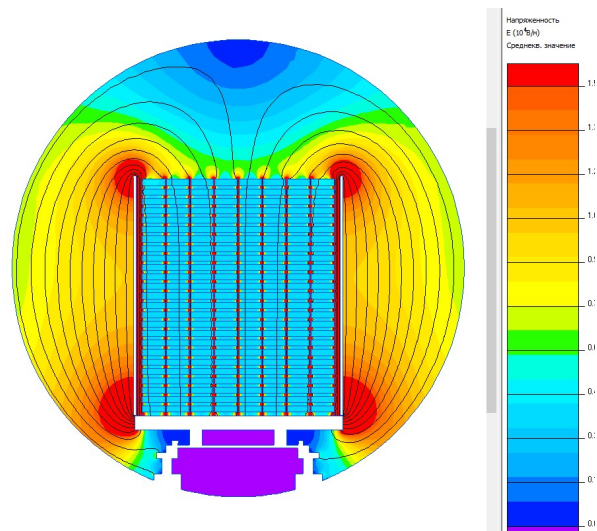


Рисунок 8 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 4$ см

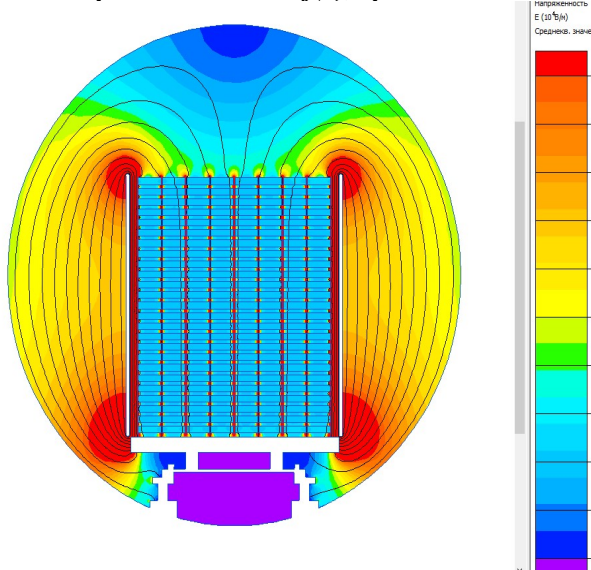


Рисунок 9 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 6$ см

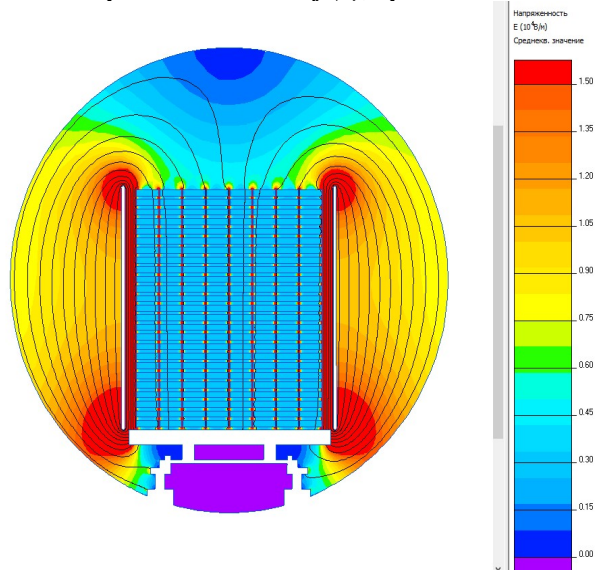


Рисунок 10 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 8$ см

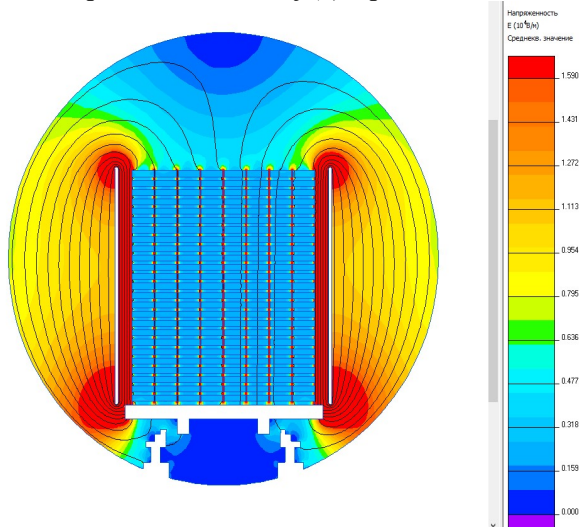


Рисунок 11 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 10$ см

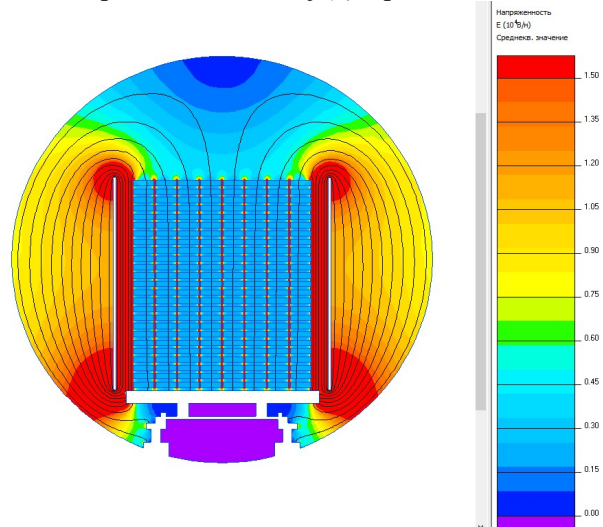


Рисунок 12 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 12$ см

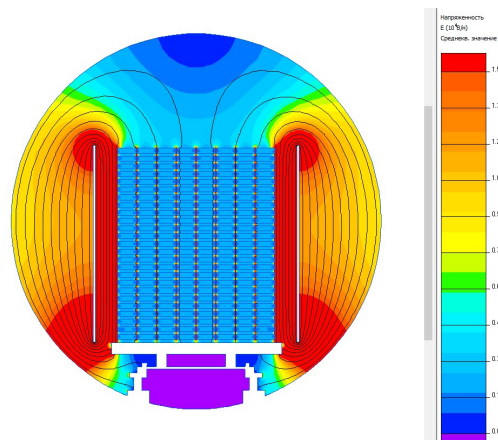


Рисунок 13 – Картина распределения напряженности $E = f(\delta)$, при $\delta = 18$ см

Далее было проведено исследование влияния величины воздушного зазора, образуемого рабочими электродами и боковыми стенками штабеля древесины на процесс её сушки. При моделировании процесса опыты проводились для следующих значений воздушного зазора (с одной стороны штабеля): $\delta = 2; 4; 6; 8; 10; 12$ и 18 см при частоте ВЧ-генератора равной $13,56$ МГц. Поскольку данная частота широко применяется на предприятиях деревообрабатывающей промышленности. Результаты проведенных исследований распределения $E = f(\delta)$ по сечению штабеля древесины приведены в виде картин распределения электромагнитного поля на рисунках 7 – 13.

Из анализа картин распределения $E = f(\delta)$ сделаны следующие выводы:

- с увеличением воздушного зазора напряженность электрического поля в штабеле уменьшается, а продолжительность сушки возрастает;
- исходя из условия сохранения целостности рабочих поверхностей электродов, которые могут быть повреждены механически при размещении штабеля в межэлектродном пространстве ВДК рекомендуется принимать оптимальный воздушный зазор в пределах от 4 до 8 см с каждой стороны штабеля.

Заключение

Проведенные исследования и для других пород древесины также подтвердили правильность сделанных в работе выводов, направленных на дальнейшее повышение эффективности процесса сушки древесины в ВДК.

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 (*Picea abies* 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.: Гозэнергоиздат, 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 Shnittholztrocknung. 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

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 станов, 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 станов.

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

Введение

Машиностроение и металлургия являются не только одними из самых крупных отраслей промышленности в России, но и входят в число самых энергоемких производств, так как значительную часть всего оборудования занимают устройства, обеспечивающие разнообразные виды термической обработки металлических изделий.

Важной составляющей машиностроения является прокатное производство, в котором, для получения высококачественной продукции, используются мощные прокатные станы. Прокатный стан является взаимосвязанным комплексом агрегатов и машин предназначенный для осуществления пластической деформации металла. Структурная схема главной линии прокатного стана представлена на рисунке 1.

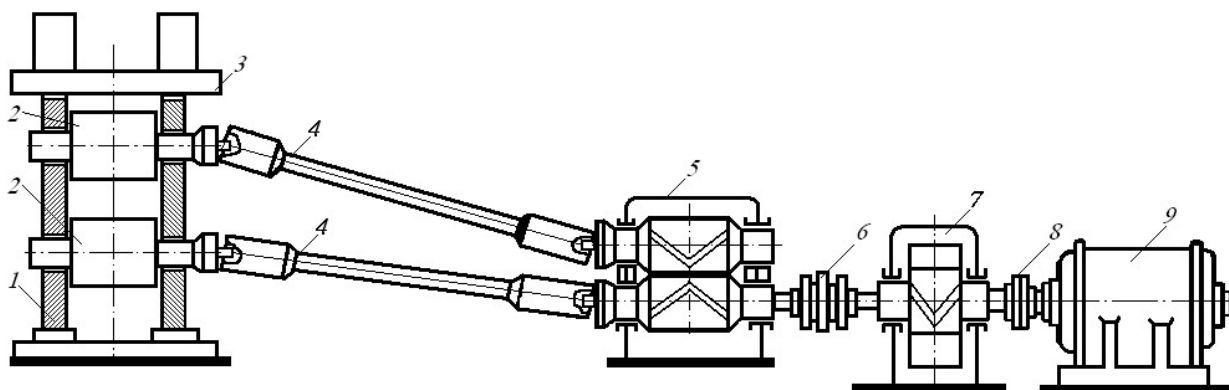


Рисунок 1 – Структурная схема главной линии рабочей клетки прокатного стана:

1 – станина; 2 – прокатные валки в клетке; 3 – рабочая клетка стана; 4 – шпиндель;

5 – шестеренная клетка стана; 6 – коренная муфта; 7 – механический редуктор;

8 – моторная муфта; 9 – электрический двигатель

Современные станы горячей или холодной прокатки представляют собой сложные, полностью автоматизированные линии. Их надежная и бесперебойная работа в значительной степени определяется качеством рабочих и опорных прокатных валков. Рабочие валки из всех звеньев технологической цепи обладают наименьшим запасом прочности, так как в процессе работы подвергаются повышенным нагрузкам и воздействию значительных контактных давлений из-за непосредственного соприкосновения с обрабатываемым металлом.

Основная часть

Можно выделить основные требования, предъявляемые к рабочей поверхности прокатных валков: высокая и равномерная твердость после закалки; прокаливаемость; износостойкость; теплостойкость (до 350-400 °С); контактная прочность; стойкость против

образования различных поверхностных дефектов; отсутствие дефектов макро- и микроструктуры. Технические требования к валкам прокатных станов приведены в таблице №1.

Таблица 1 – Технические требования к валкам прокатных станов

Критерий	Рабочие валки	Опорные валки
Валки станов холодной прокатки		
Твердость бочки вала, HSD	90-102	70-85
Разброс значений твердости по бочке вала, HSD	1-2	1-2
Глубина рабочего слоя (по радиусу), мм	45	100
Валки станов горячей прокатки		
Твердость бочки вала, HSD	75-90	45-69
Разброс значений твердости по бочке вала, HSD	-	До 3

Достижение необходимых характеристик поверхностного слоя вала может обеспечиваться как за счет изменения его химического состава (например, в процессе цементации), так и в результате изменения фазового и структурного состояний по сравнению с сердцевиной. Для производства валков используются высокоуглеродистые легированные стали, однако их химический состав не может в полной мере обеспечить требуемое качество готовых валков [1], поскольку износостойкость и вероятность зарождения трещин зависит от множества факторов, определяемых, прежде всего, термической обработкой.

Прочность, пластичность, ударная вязкость стали повышается по мере измельчения зерна аустенита, поэтому важно установить правильный режим нагрева для получения как можно более мелкого зерна. Важно проводить термообработку при минимально возможной температуре, обеспечивающей полное завершение α - γ -превращения и гомогенизацию аустенита (для конкретной марки стали), а также применять большие скорости нагрева, чтобы замедлить рост зерна аустенита [2]. Обычный интервал температур аустенитизации сталей для валков составляет 850–950 °С.

Валки прокатных станов проходят сложную термическую обработку, включающую многостадийную нормализацию и отжиг, а на заключительной стадии подвергаются поверхностной закалке с отпуском. В общем объеме трудовых затрат на производство рабочих валков термическая обработка занимает порядка 20 % [3].

В настоящее время на практике применяют различные способы нагрева валков под закалку [4, 5]:

- газопламенный нагрев с использованием газокислородных горелок;
- косвенный электронагрев с использованием печи сопротивления;
- индукционный нагрев;
- плазменный нагрев с помощью плазмотрона;
- лазерный нагрев.

Из вышеперечисленных способов нагрева индукционный способ термообработки металлов, пройдя более чем вековой путь развития, зарекомендовал себя как наиболее эффективный способ бесконтактного подвода тепла в электропроводящую среду.

При использовании индукционного нагрева с большой скоростью основные превращения исходных фаз в аустенит смещаются в область более высоких температур, а весь процесс происходит в более широком температурном интервале, благодаря чему, зерна аустенита становятся более измельченными. Вследствие малого времени аустенитизации при индукционном нагреве, структура аустенита отличается весьма большой неоднородностью и усложнением внутризеренного строения, что является положительным фактором, способствующим повышению прочности и пластичности по сравнению с поверхностным нагревом, реализуемым с помощью других вышеперечисленных способов нагрева. Важно точно соблюдать режим нагрева для того, чтобы не допустить перегрева поверхности вала, ведущего к пережогу и обезуглероживанию, а также недостаточного нагрева для завершения

аустенизации, что приводит к неполному растворению феррита, его появлению в закаленном слое и ухудшению твердости и износостойкости валков.

Следует отметить, что различные стали воспринимают закалку по-разному, поэтому повышенную твердость возможно получить лишь в слое ограниченной глубины, толщина которого называется прокаливаемостью стали и зависит от ряда факторов [6]. Оптимальная температура T на критическом расстоянии (имеющем полумартенситную структуру) должна лежать в пределах:

$$T_{max} > T > T_{c3}, \quad (1)$$

где T_{max} – предельная температура нагрева необходимая для получения мелкого зерна аустенита для данной марки стали;

T_{c3} – минимальная температура нагрева необходимая для получения мартенсита при закалке с критической скоростью охлаждения для данной марки стали.

После закалки, на границе закаленного слоя и переходной зоны, может сформироваться опасный пик растягивающих напряжений, провоцирующих образование отслоений при изготовлении и эксплуатации валка. Для предотвращения возникновения этих явлений необходимо проводить предварительный прогрев сердцевины валка, с целью сглаживания и рассредоточения этого пика, а также смещения его в более глубокие слои, в результате чего увеличивается толщина закаленного слоя и переходной зоны, повышаются показатели качества валковой продукции.

Индукционная поверхностная закалка бочки валка может быть реализована с помощью двух основных способов нагрева:

1. одновременный нагрев всей поверхности бочки, подлежащей закалке, с помощью одного или нескольких неподвижных индукторов;
2. непрерывно-последовательный с нагревом участка бочки валка и перемещением индуктора вдоль бочки с определенной скоростью.

По сравнению с одновременным нагревом, непрерывно-последовательный нагрев требует применения источника питания небольшой мощности. Суть данного способа нагрева заключается в том, что валок, подлежащий закалке, устанавливается в закалочную установку с размещенными на ней индуктором и специальным спреером, которые имеют возможность с заданной скоростью перемещаться вдоль бочки валка.

Основными современными тенденциями в развитии машиностроительной отрасли и в целом, в промышленности, являются энергоэффективность и энергосбережение. Так как область термической обработки таких крупногабаритных изделий как валки прокатных станов является чрезвычайно энергозатратной, то внедрение энергоэффективных способов термообработки может стать одним из ключевых факторов для экономии топливно-энергетических ресурсов. Успешным решением задачи, направленной на получение изделия с требуемой твердостью и прочностью закаленной поверхности при повышении энергоэффективности, может стать применение индукционной закалки валков прокатных станов с использованием бегущего электромагнитного поля (БЭМП). На рисунке 2 представлен эскиз установки индукционного нагрева с бегущим электромагнитным полем для закалки крупногабаритных валков прокатных станов.

В предлагаемой авторами [7] установке реализуется непрерывно-последовательный способ закалки с использованием индуктора повышенной частоты и индуктора с БЭМП промышленной частоты, который обеспечивает, не только глубинный нагрев валка, но и возникновение в нём электродинамических сил, обеспечивающих его вращение, и, как следствие, получение более равномерного распределения источников теплоты в закаливаемом слое. Устройство работает следующим образом.

Перед началом процесса закалки нижнюю траверсу 1 с закалочным блоком и сложенный защитный кожух 2 устанавливают в крайнее нижнее положение. К закалочному блоку, включающему в себя два водоохлаждаемых индуктора 3 и 4, а также устройство 5 воздушного дутья и спреер 6, подключают шланги подачи воздуха и рукава водоснабжения (на эскизе не показаны).

Подлежащий закалке валок 7 прокатного стана пропускают через нижнюю траверсу закалочного блока и устанавливают на нижний центр 8. Затем валок фиксируют в вертикальном положении с помощью верхнего центра 9, который опускают в требуемое положение (определяемое геометрическими размерами валка) вместе с верхней траверсой 10 с помощью электропривода 11. Нижнюю траверсу устанавливают на уровне нижней части бочки 12 валка, поверхность которой подлежит закалке.

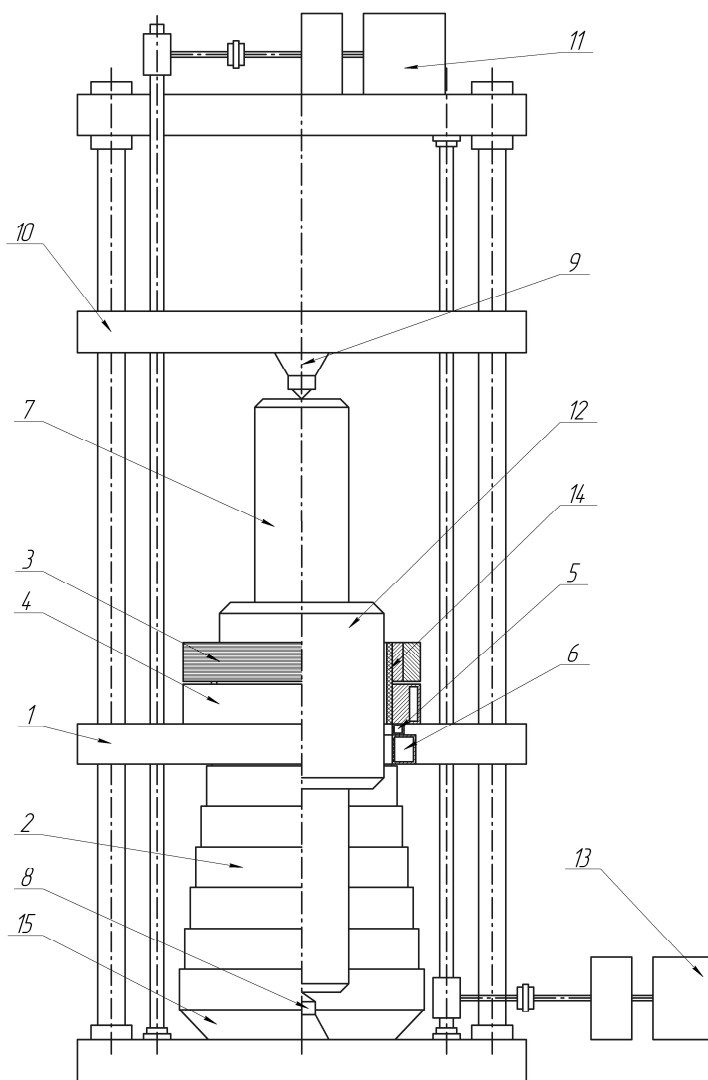


Рисунок 2 – Установка индукционного нагрева с бегущим электромагнитным полем для закалки крупногабаритных валков прокатных станов

Технологический процесс закалки начинается с момента подачи на индуктор 3, создающий БЭМП, тока промышленной частоты и воды для охлаждения. Далее запускают цикл предварительного нагрева бочки валка, при котором нижняя траверса с помощью электропривода 13 нижней траверсы начинает перемещаться вверх до границы закаливаемой части бочки валка, затем опускается вниз в исходное положение. Данная процедура повторяется до тех пор, пока температура поверхности валка не достигнет значений, заданных в технологической карте. Процесс предварительного нагрева может занимать значительное время, которое зависит от размеров и массы валка. Футеровка 14 позволяет уменьшить тепловые потери с поверхности бочки валка на этапах предварительного нагрева и закалки, способствуя тем самым увеличению термического КПД, а также выравниванию средней температуры по длине бочки валка. Вместе с тем её толщина должна быть минимальной, так как с ростом толщины футеровки уменьшается значение естественного коэффициента мощности установки ($\cos\varphi$) [8]. Одновременно с

перемещением нижней траверсы поднимаются и опускаются полые секции телескопического защитного кожуха, который обеспечивает дополнительную внешнюю изоляцию валка и уменьшение потерь тепла излучением при нагреве бочки валка.

После цикла предварительного нагрева осуществляют закалочный проход, который является заключительным в процессе закалки поверхности бочки валка. На закалочном проходе нижняя траверса начинает движение из нижнего положения вверх при включенном индукторе с бегущим электромагнитным полем промышленной частоты, который обеспечивает вращение валка. Одновременно с этим подают электропитание и водоохлаждение на закалочный индуктор 4 повышенной частоты, а также осуществляют подачу воздуха в устройство воздушного дутья и подачу охлаждающей воды под давлением в спрейер для закалки нагретой поверхности бочки валка. Использование закалочного индуктора повышенной частоты позволяет обеспечить большую мощность тепловыделения в нагреваемом слое, тем самым способствуя увеличению скорости нагрева и повышению

производительности установки в целом. Поток воздуха из устройства воздушного дутья отсекает от зоны нагрева брызги воды, отраженные от поверхности бочки валка, тем самым обеспечивая повышение качества закалки. При этом вода и образующийся конденсат стекают по стенкам защитного кожуха в воронку водосборника 15 системы оборотной воды. После завершения технологического процесса закалки поверхности бочки валка траверсу с закалочным блоком опускают в крайнее нижнее положение, валок освобождают от фиксации и извлекают из установки.

Заключение

Рассмотренное техническое предложение направлено на решение одной из актуальных задач, стоящих перед металлургическим машиностроением, а именно, на повышение энергоэффективности индукционной закалки крупногабаритных валков прокатных станов. При этом этим необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований с использованием современных программных методов расчета, направленных на дальнейшую разработку энергоэффективных индукционных устройств для закалки крупногабаритных валков прокатных станов [9], отвечающих высоким требованиям по критериям долговечности, износостойчивости, трещиностойкости, прочности и твердости рабочих поверхностей валков.

Решение данной задачи позволит повысить надёжность и продолжительность работы прокатных станов, их эксплуатационные свойства, производительность, уменьшить время простоев из-за перевалки валков и, как следствие, улучшить технико-экономические показатели главной линии рабочей клетки прокатного стана.

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 станов» / 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. Shepelyakovskiy, K.Z. Hardening of machine parts by surface hardening during induction heating / K.Z. Shepelyakovskiy. // - M., 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. – M., 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. - T. 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

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.

Введение

В настоящее время минеральное трансформаторное масло, производимое из нефти, является основной изолирующей и охлаждающей средой в высоковольтном энергетическом оборудовании. В процессе эксплуатации трансформаторные масла претерпевают глубокие изменения, включающим изменения его химических и электрофизических свойств [1]. Доминирующим фактором «старения» трансформаторного масла (ТМ) являются окислительные превращения входящих в его состав углеводородов, смолистых и сернистых продуктов [2]. Срок службы трансформатора в значительной мере определяется состоянием его изоляционной системы, которую составляет ТМ и бумажная изоляция. При этом именно состав и физико-химические свойства масла во многом определяет скорость процесса деградации бумажной изоляции [3]. Для предотвращения быстрого истощения масляного ресурса предусмотрены следующие меры, принятие которых значительно продлит срок службы ТМ: установка расширителей с фильтрами для поглощения воды и кислорода, а также выделяемых из масла газов; избегание рабочего перегрева масла; периодические чистки; непрерывная фильтрация масла; введение антиокислителей.

Что касается последнего, то в РФ все сорта ТМ, применяемых на промышленном оборудовании, обязательно ингибированы антиокислительной присадкой – ионолом (2,6-дитретичный бутилпаракрезол, известный еще как агидол-1). Присадка взаимодействует с активными пероксидными радикалами, возникающими в цепи окислительной реакции углеводородов. Применение присадок позволяет существенно продлить срок службы, но не отменяет регулярную очистку последнего. С точки зрения финансовых затрат второй вариант видится более перспективным, поскольку позволяет повторно использовать нефтепродукт по прямому назначению. Для длительной и безопасной работы маслонаполненного оборудования ТМ должно обладать следующими качествами:

1. Иметь высокое значение пробивного напряжения и низкое и стабильное значение $tg\delta$;
2. Иметь достаточную подвижность и хорошую теплопроводность, небольшую величину кислотного числа, высокую температуру вспышки, низкую температуру застывания, обладать стабильностью.

В ТМ, как в неполярных жидкостях при частоте 50 Гц, диэлектрические потери определяются потерями тока проводимости [4]. Диэлектрические потери вызываются ионной и электрофоретической проводимостями, то есть движением электрических зарядов по направлению электрического поля. Кислоты, коллоидные вещества, перекиси, адсорбированные на поверхности твердой изоляции, являются основной причиной

повышения последнего. Количество растворённой воды в масле мало меняет $\text{tg}\delta$, но присутствие незначительного количества воды в виде эмульсии резко увеличивает указанную величину. В первом случае вода вызывает ионную проводимость, во втором – электрофоретическую. Эмульсионная вода в противоположность растворенной повышает $\text{tg}\delta$ за счет роста электрофоретической проводимости [5]. При наличии в масле некоторых полярных веществ оно приобретает способность самоэмульгироваться поглощая влагу из воздуха, при этом резко возрастает $\text{tg}\delta$. С повышением температуры и влажности диэлектрические потери возрастают. С понижением частоты приложенного напряжения, как правило, диэлектрические потери тоже увеличиваются. Содержание в масле обезвоженных кислот (муравьиной, уксусной, масляной), альдегидов, спиртов, фенолов, крезолов и перекисей в концентрации до 0,5% по массе не увеличивает $\text{tg}\delta$ масла. Однако при концентрации этих веществ выше указанной величины, $\text{tg}\delta$ масла резко увеличивается. Повышение тангенса угла диэлектрических потерь в изоляционных маслах происходит за счет асфальто-смолистых веществ и мыл, которые образуют в масле коллоидные растворы; кроме того, к повышению значения $\text{tg}\delta$ приводит присутствие воды в масле; высокое кислотное число и наличие свободных кислот [6]. Смолистые вещества нейтрального или кислого характера могут оставаться в маслах при недостаточно тщательной очистке или образовываться при старении масла в результате реакций окислительной конденсации и полимеризации. И те, и другие смолистые продукты плохо растворяются в масле, образуют коллоиды и являются одной из основных причин возникновения электрофоретической проводимости. Одним из наиболее эффективных способов снижения $\text{tg}\delta$ ТМ является адсорбционная очистка с помощью различных адсорбентов. В отечественной практике наиболее для этого используется синтетический адсорбента – силикагель марки КСКГ. Силикагель является пористым веществом с большой адсорбционной поверхностью, представляющий собой гель двуокиси кремния SiO_2 , высушенный и прокаленный при 600°C . Примеси задерживаются на его поверхности и во внутренних порах адсорбентов [7]. Силикагель очищает масло от продуктов окисления, асфальто-смолистых, сернистых и азотистых соединений, обеспечивая стабильность требуемых параметров трансформаторных масел на длительный период работы.

Однако несмотря на изученность теории адсорбционной очистки масел и регулярно появляющиеся публикации на эту тему [8, 9, 10], некоторые процессы взаимодействия ТМ и силикагеля еще не изучены. В частности, было показано, что неполярные углеводороды, содержащие непредельные связи, не удаляются из масла никакими адсорбентами [11].

В этой связи интересным представляется сравнение эффективности адсорбционной очистки силикагелем марки КСКГ для удаления из масел продуктов деградации, образующихся при разрядных и термоокислительных процессах в маслах, с точки зрения динамики изменения величины $\text{tg}\delta$ масел.

Основная часть

Исходя из рассмотренного выше целями данного исследования являлись:

1. Проведение исследования влияния разрядных процессов разной степени интенсивности на изменения $\text{tg}\delta$ ТМ;
2. Проведение исследования влияния адсорбционной очистки силикагелем марки КСКГ ТМ, подвергнутых разрядным процессам на изменение $\text{tg}\delta$;
3. Исследование сравнительной эффективности адсорбционной очистки для снижения $\text{tg}\delta$ ТМ, состаренных в условиях длительной термоокислительной деструкции, а также под воздействием разрядных процессов;
4. Исследование влияния повторной адсорбционной очистки силикагелем на $\text{tg}\delta$ ТМ, подвергнутых разрядным и термоокислительным процессам деградации.

Для применения ТМ в промышленной эксплуатации важным фактором является измерение его диэлектрических характеристик, из которых наиболее информативной является $\text{tg}\delta$. Воздействие разрядных процессов разной степени интенсивности на образцы ТМ осуществлялось при помощи использования прибора АИД-70. Данный прибор был использован в качестве источника высокого переменного напряжения с максимальным

выходным переменным током до 20 мА. Для осуществления деградации масел под воздействием высоковольтных разрядов, образцы масел помещались в специальную измерительную ячейку, которой штатно комплектуется прибор АИМ-80 – аппарат испытания электроизоляционных жидкостей на электрическую прочность повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц. Латунные электроды в измерительной ячейке имеют диаметр полусферы 25 мм. Стандартное расстояние между электродами было уменьшено до величины 0,5 мм, что позволило осуществлять длительные устойчивые разрядные процессы в исследуемых образцах.

Для определения значения $\text{tg}\delta$ образцов ТМ была использована автоматизированная установка – «Тангенс 3М». Помимо значения $\text{tg}\delta$ установка позволяет измерять емкость, напряжение приложенное к измерительной ячейке, а также температуру пробы трансформаторного масла. Измерение проводилось согласно ГОСТ 6581-75 и ИЕС 60247, с погрешностью измерений $\text{tg}\delta = \pm 0,01 \text{ tg} + 0,0001$.

В качестве объекта исследования были использованы следующие образцы ТМ:

- образец масла марки ВГ, изготовленное по технологии гидрокрекинга; образец ТМ отработавшее свой срок и подлежащая утилизации (находилось в эксплуатации в силовом трансформаторе более 40 лет). По эксплуатационным характеристикам масло ВГ полностью соответствует требованиям стандарта МЭК 296 к маслам класса ПА, т.е. стойкостью к окислительным реакциям;
- образец ТМ, подвергшейся длительным термоокислительным процессам и подлежащий утилизации, был получен от ФКП «Казанский Государственный казенный пороховой завод». У данного образца ухудшились электроизоляционные свойства, а также химические и электрофизические показатели. Цвет его был темно-коричневый, что свидетельствует о большом содержании полиароматических соединений. Данное масло, в отличие от масла ВГ, было изготовлено по устаревшей технологии и в свежем виде содержало высокое количество ароматических углеводородов. Величина $\text{tg}\delta$ в залитых оборудование свежих маслах такого типа выше, нежели у свежих масел, произведенных по технологии гидрокрекинга. В процессе термодеструкции в таких маслах особенно интенсивно образуются коллоидные частицы.

Перед каждым опытом по воздействию разрядных процессов на масла ячейка с электродами очищалась, высушивалась и промывалась испытываемым маслом. Каждая проба масла объёмом 500 мл по очереди заливалась в измерительную ячейку от аппарата АИМ-80. Далее с помощью АИД-70 подавалось напряжение 10 – 15 кВ на ячейку с электродами и начинался процесс воздействия разрядных процессов с целью инициирования возникновения устойчивого разрядного процесса с частотой 50 Гц. Образцы масел подвергались разрядным процессам с различной продолжительностью времени, приведённой в таблице 1. В результате экспериментов были получены четыре пробы ТМ ВГ с различной степенью деградации.

Таблица 1 - Продолжительность разрядных процессов в образцах трансформаторного масла

№ образца масла	Продолжительность воздействия электрических разрядов эксперимента, минуты
1	5
2	10
3	30
4	60

Чем дольше ТМ подвергалось процессам горения, тем темнее становился его цвет. Это можно объяснить тем, что в ходе воздействия разрядов в масле образуются различные продукты горения сажистого характера, что вызывает потемнение (почернение) масла. В частности, образец масла №4 в колбе диаметром 5 см имел вид черной непрозрачной субстанции. Для всех полученных образцов масел были измерены значения $\text{tg}\delta$ при различных температурах. Эксплуатационное масло, окисленное в условиях реальной эксплуатации,

получил обозначение образец №5. Адсорбционная очистка всех образцов ТМ (№ 1-5) проводилась в лабораторных условиях. Для этого в пробы масел объемом 40 мл добавлялся силикагель марки КСКГ объемом 20 мл. Очистка силикагелем каждого образца масла продолжалась на протяжении 120 часов (5 суток) с регулярным измерением через каждые 24 ч величины $\text{tg}\delta$ очищаемых образцов. Кроме того, два образца очищенных масел были подвергнуты повторной адсорбционной очистке в течение 120 часов (5 суток) с помощью новой порции силикагеля. Для повторной очистки использовались очищенные образцы №4 и старое эксплуатационное масло №5.

Подготовка проб масла и проведение всех экспериментов проводились при температуре воздуха $20 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности $65 \pm 5\%$.

В таблице 2 представлены измеренные значения $\text{tg}\delta$ для образцов масел, подвергнутых различной степени интенсивности разрядных процессов. Нумерация образцов приведена согласно таблице 1.

Таблица 2 - Результаты измерений начальных значений $\text{tg}\delta$

№ образца	$\text{tg}\delta$ [%], при различных температурах, °C		
	25 °C	70 °C	90 °C
1	0,008	0,045	0,066
2	0,019	0,076	0,142
3	0,212	1,215	1,429
4	0,246	2,537	5,185

Согласно [12] для регенерированных масел, предназначенных к заливке в силовые и измерительные трансформаторы классов напряжения 35-500 кВ, максимально допустимые значения $\text{tg}\delta$ при 90°C не должны превышать 1,5 %. Образцы масел № 1 и № 2 соответствуют нормируемому значению, образец №3 фактически имеет граничное значение, а образец №4 не может эксплуатироваться в электрооборудовании. Таким образом, увеличение длительности разрядных процессов в минеральных маслах приводит к накоплению продуктов деградации, увеличивающих $\text{tg}\delta$ масел. На основе этого можно предположить, что образующиеся продукты деградации имеют полярный характер.

Далее было проведено исследование изменения величины $\text{tg}\delta$ масел от температуры, а также стабильности получаемых результатов измерения. Для исследования был выбран образец №3, подвергнутый деструкции в течение 30 мин, что являлось средним значением в диапазоне 5-60 мин (см. таблицу 1). Эксперимент проводился тремя сериями при различных температурах – при повышении температуры от 25°C до 90°C , а затем при понижении температуры. Полученные значения измерений приведены на рисунке 1 и в таблице 3.

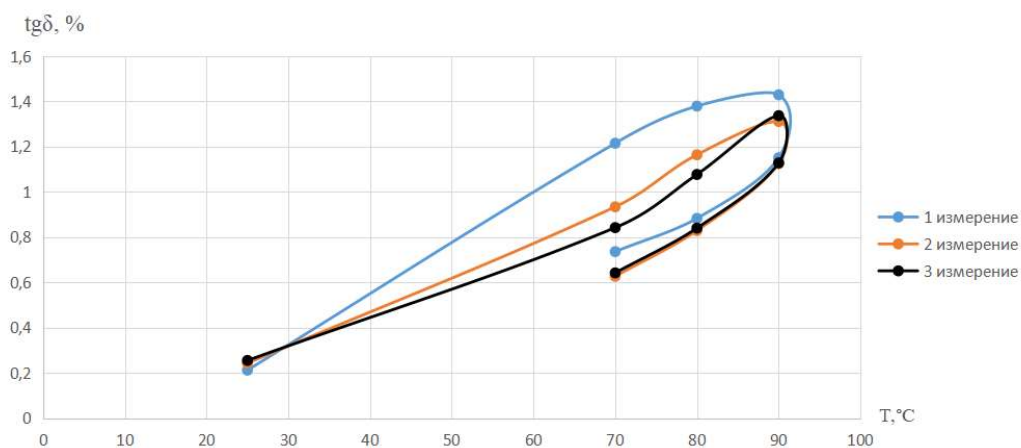


Рисунок 1 - Графики последовательных измерений $\text{tg}\delta$ №3 пробы масла

Таблица 3 - Числовые значения тангенса угла диэлектрических потерь для пробы масла

№3

№ п.п.	tgδ, %						
	25 °С	70 °С	80 °С	90 °С	↓90 °С	↓80 °С	↓70 °С
1 измерение	0,212	1,215	1,379	1,429	1,151	0,883	0,736
2 измерение	0,243	0,934	1,164	1,311	1,125	0,829	0,627
3 измерение	0,255	0,842	1,077	1,337	1,128	0,84	0,642

Можно видеть, что при одних и тех же температурах tgδ остается не стабильной величиной, что вероятно, связано с появлением изменений в исследуемом образце масла. Однако более важным представляется другой полученный результат. Проведенный эксперимент показывает, что tgδ всегда повышается с увеличением температуры и, соответственно, снижается при последующем снижении температуры. Такой характер изменения tgδ наблюдается в полярных диэлектриках, у которых с повышением температуры увеличивается частота и амплитуда колебаний диполей и повышается вероятность перехода их из одного положения равновесия в другое [13]. Полученный результат подтверждает сделанное выше предположение, что при разрядных процессах в ТМ увеличивается содержание соединений, имеющих полярный характер.

Для определения влияния адсорбционной очистки на изменение tgδ ТМ, состаренные в различных условиях, были использованы два образца: образец №4, характеристика которого приведены в таблице 1 и 2; образец №5, состаренный в условиях длительной термоокислительной деструкции. В них был добавлен силикагель марки КСКГ. Измерения тангенса угла диэлектрических потерь для обоих образцов ТМ проводилось через каждые 24 ч (сутки) в течение 5 дней. Полученные числовые значения измерений приведены в таблице 4. Измерения проводились при температуре 90 °С, поскольку, согласно [12], именно при этой температуре проводится оценка пригодности масел для эксплуатации.

Таблица 4 - Влияние длительности адсорбционной очистки на величину tgδ при температуре 90 °С.

t (время), ч. после применения силикагеля	tgδ, %	
	проба № 4	проба № 5
0 ч. (до исп. силикагеля)	5,185	0,639
1 день (24 ч.)	0,079	0,406
2 день (48 ч.)	0,049	0,313
3 день (72 ч.)	0,037	0,261
4 день (96 ч.)	0,029	0,212
5 день (120 ч.)	0,025	0,184

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что адсорбционная очистка силикагелем снижает значения tgδ ТМ, деградированных как в условиях разрядных процессов, так и в ходе термоокисления. Причем, наилучшие результаты очистки силикагель проявляет в отношении масла №4, состаренного в условиях разрядных процессов.

Далее была осуществлена повторная адсорбционная очистка рассматриваемых масел. Для этого очищенные в течение 120 часов масла были перелиты в чистые емкости с последующим добавлением свежей порции силикагеля марки КСКГ, объем которого был равен половине объема отобранных проб. Повторная адсорбционная очистка масел также осуществлялась в течение 120 часов, но уже без отбора промежуточных проб для анализа. Результаты влияния обеих адсорбционных очисток силикагелем на tgδ масел приведены в таблице 5, а также на рисунке 2.

Таблица 5 - Влияние адсорбционной очистки силикагелем на tgδ трансформаторных масел

Длительность выдержки в силикагеле, ч.	tgδ, %	
	Проба №4	Проба №5
0 ч. (исходные)	5,185	0,639
Первичная очистка (120 ч.)	0,025	0,184
Повторная очистка (240 ч.)	0,013	0,134

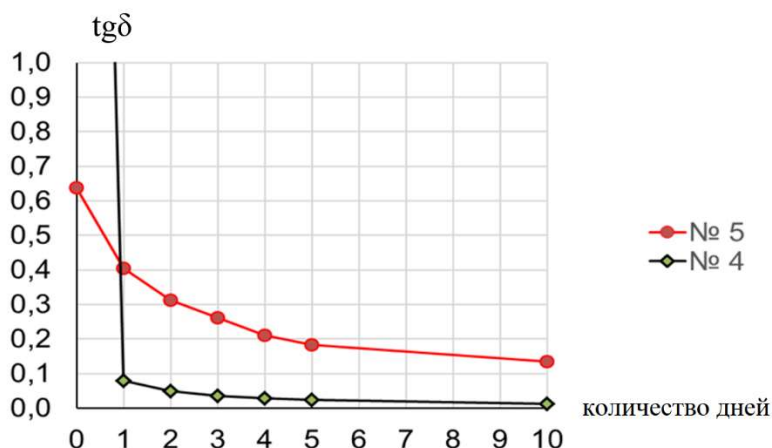


Рисунок 2 - Динамика изменения tgδ масел, очищаемых силикагелем КСКГ. После 5 суток была произведена замена силикагеля. Результаты представлены согласно таблице 3 и 4

Анализ представленных на рисунке 2 кривых, показывает, что с определенного момента величина tgδ практически не уменьшается. Таким образом, на практике всегда существует возможность оптимизации процедуры адсорбционной очистки старых масел с точки зрения расхода силикагеля и длительности адсорбционной очистки.

Заключение

Результаты моделирования деградации минерального ТМ под действием электрических разрядов показывают, что при разрядных процессах в числе прочих продуктов деградации образуются соединения, имеющие полярный характер. Об этом свидетельствуют как последовательный рост величины диэлектрических потерь по мере увеличения длительности деградации, так и характер зависимости tgδ от температуры. Адсорбционная очистка силикагелем визуально восстанавливает масло до исходного состояния по цвету и прозрачности. При этом tgδ снижается до нормируемых значений. Данный факт также подтверждает, что значительная часть продуктов деградации масел, состаренных под воздействием электрических разрядов, имеет полярный характер. Повторная адсорбционная очистка свежим силикагелем лишь незначительно снижает величину tgδ. Из этого следует, что можно сформировать оптимальные параметры глубины адсорбционной очистки масел, учитывающие как показатели качества ТМ, так и суммарный расход адсорбента.

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

В.И. БИРЮЛИН, Д.В. КУДЕЛИНА

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 процессов 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.

Введение

Промышленные предприятия в настоящее время являются крупными потребителями энергетических ресурсов, в том числе и электроэнергии. Поэтому от эффективности потребления электрической энергии для производственных и других нужд предприятий во многом зависят итоговые результаты функционирования, включая и прибыльность предприятий. Исходя из этого, можно утверждать, что проведение достаточно глубоких исследований процессов использования электрической энергии имеет большую актуальность. Одной из основных целей таких исследований является нахождение обоснованных значений эффективности потребления энергоресурсов на рассматриваемом предприятии. Проведение таких исследований является сложной задачей, даже если рассматривается только потребление электрической энергии без учета других видов энергетических ресурсов.

Проблема решения подобных задач состоит в том, что схема электроснабжения предприятия (от точек приема электроэнергии до электроприемников) представляет собой сложную по своей структуре систему. Также затрудняет решение рассматриваемой задачи наличие многочисленных и разнородных факторов, во многом определяющих уровень эффективности использования энергоресурсов на рассматриваемых предприятиях [1–6]. В зарубежных исследованиях вопросы эффективности использования энергетических ресурсов рассматриваются в большей мере влияния этих процессов на климатические условия [7, 8], что приводит к тому, что данные исследования изучают энергетические проблемы на более высоком уровне структуры общества, чем отдельные промышленные предприятия.

Наличие большого количества разнородных по своей природе факторов, влияющих на уровень эффективности использования электрической энергии, а также имеющаяся в большинстве случаев неполнота и неопределенность в применяемых для исследования процессов энергопотребления данных создает большие сложности при использовании классических математических моделей, включающих в себя линейные и нелинейные алгебраические и дифференциальные уравнения [9]. Также следует учитывать, что для повышения достоверности получаемых результатов следует использовать и знания экспертов в данной предметной области.

Существование неопределенности и неполноты во входных данных при решении задач нахождения оценки эффективности потребления электрической энергии на промышленных предприятиях объясняется многими причинами, главными из которых являются:

– существование в настоящее время значительных сложностей для выполнения исследовательских работ по изучению процессов использования электрической энергии на промышленных предприятиях, создаваемых собственниками предприятий, устанавливающих режим коммерческой тайны для информации о своих предприятиях;

– присутствие неполноты или даже частичного отсутствия необходимых входных данных, представляемых в количественной форме, о функционировании системы электроснабжения предприятия и протекании производственных процессов на рассматриваемом предприятии;

– необходимость использования большого количества критериев, учитывающих различные стороны функционирования как всего предприятия, так и системы электроснабжения и разные формы (как количественная, так и качественная) применяемых исходных данных.

Для преодоления рассмотренных выше проблем в настоящее время широко применяется математический аппарат нечеткой логики. Сейчас он представляет одно из наиболее быстро развивающихся направлений, применяемых для изучения процессов, протекающих в сложных производственных системах [10–12]. Математические модели, основанные на аппарате нечеткой логики, находятся в более близкой связи с человеческим мышлением по сравнению с моделями, состоящими из алгебраических и дифференциальных уравнений, и обеспечивают обработку неопределенности, неполноты исходных данных и применение знаний и опыта экспертов.

Такие модели являются основой для построения систем нечеткого логического вывода, служащих для нахождения различных значений, в том числе и оценок эффективности потребляемых энергоресурсов [13–17]. Выходные значения, получаемые в таких системах, имеют простое и наглядное представление, что является преимуществом таких систем, но данные системы также имеют и недостаток, состоящий в том, что они не обеспечивают автоматического формирования новых знаний, используемых для работы систем нечеткого логического вывода. Данный недостаток может заметно снизить обоснованность получаемого результата при работе таких систем. Кроме этого недостатка, следует отметить, что нечеткие правила вывода при разработке систем нечеткого логического вывода создаются экспертами, что придает им некоторую долю субъективности. Также необходимо учитывать, что функции принадлежности, используемые в системах нечеткого логического вывода, определяются в большинстве случаев путем привлечения экспертов, и могут не полностью соответствовать реальным характеристикам рассматриваемой производственной системы.

Отмеченные выше недостатки могут значительно понизить обоснованность получаемых результатов при работе систем нечеткого логического вывода. Чтобы избежать влияния этих недостатков на полученные результаты при исследовании процессов потребления электрической энергии промышленными предприятиями, следует использовать нечеткие или гибридные нейронные сети. Применение гибридных сетей обеспечивает как возможность преодоления неполноты и неопределенности исходных данных, так и автоматическую генерацию новых знаний и правил нечеткого вывода, что в итоге позволяет получать новые знания о процессах потребления энергетических ресурсов на промышленных предприятиях.

Основная часть

Гибридная нейронная сеть может быть определена в виде нейронной сети, структура которой имеет много слоев и не содержит обратных связей [18]. Функционирование этих сетей, применяемых для решения разных задач, требует использования предварительно составленных обучающих выборок исходных данных для определения параметров функций принадлежности [19]. Также следует отметить, что разработка и последующее применение гибридных сетей обеспечивает более полное использование достоинств и частичную компенсацию недостатков нечетких систем и нейронных сетей, чем при применении их как отдельных систем исследования процессов в сложных производственно-технических системах.

Для решения поставленной задачи (получение оценки эффективности использования электрической энергии на промышленных предприятиях) использована гибридная сеть, по своим свойствам наиболее приближенная к системам нечеткого логического вывода, и принадлежащая к сетям, которая называется Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, в переводе – адаптивная сеть нечеткого вывода [20], сокращенное название таких сетей ANFIS. Применяемые в этих сетях алгоритмы работы позволяют использовать при первоначальной

настройке сети давно известные быстрые алгоритмы первоначального обучения на основе способа обратного распространения ошибки.

Для анализа использования электрической энергии авторами была создана система нечеткого логического вывода, использующая в работе алгоритм Сугено, с применением сети типа ANFIS. Была применена пятислойная нейронная сеть, в которой происходит обработка сигнала по прямому распространению [19]. Конфигурация такой сети приведена на рисунке 1.

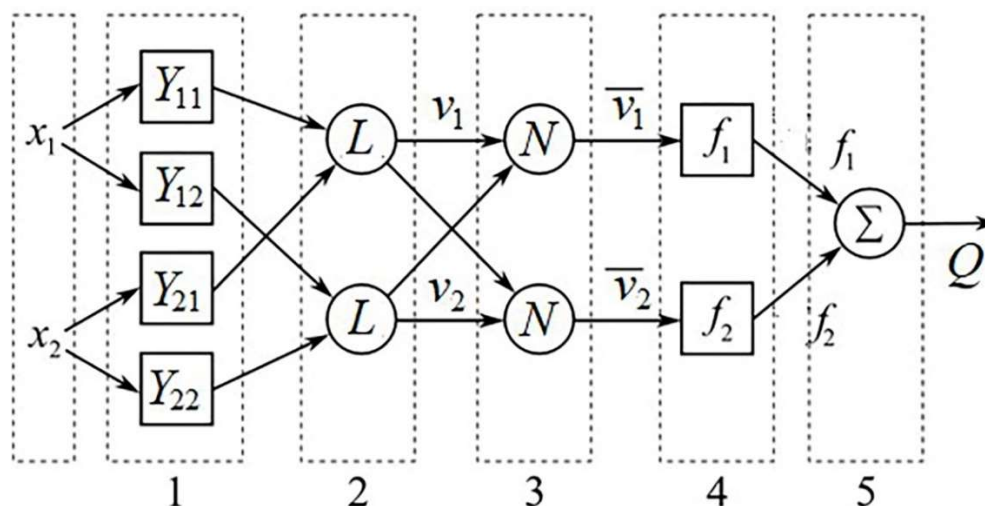


Рисунок 1 – Структурная схема сети ANFIS

Входными данными для разрабатываемой гибридной сети служат факторы, определяющие эффективность использования электрической энергии на предприятии. Выходное значение, получаемое при работе сети, представляет собой оценку уровня эффективности энергопотребления на рассматриваемом предприятии.

Все входные факторы представляются качественными оценками. Исходя из этого, данные факторы должны определяться лингвистическими переменными, или же термножествами вида $T_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{mi}\}$. В каждом множестве термы представляют нечеткие переменные или оценки того или иного фактора – «очень низкий» и далее, а также применяемые для работы с такими переменными принятые при составлении этих множеств синтаксические и семантические правила.

Далее рассмотрим разработку такой гибридной сети на примере анализа процессов потребления и использования электроэнергии. Для работы такой сети используется исходная информация в виде качественных и количественных значений, включая и экспертные оценки. Для упрощения рассмотрения взаимосвязей при функционировании промышленного предприятия все входные факторы разделяются на подгруппы:

- экономические;
- производственные;
- организационные;
- социальные.

Поэтому гибридная сеть, по существу, выполняет при своей работе функциональное отображение значений n входных факторов, представленных далее в виде вектора входных переменных X_n , на некоторую область значений выходной переменной Q (авторами принимался интервал значений от нуля до 100):

$$X = (X_1, \dots, X_n) \rightarrow Q[0, 100] \quad (1)$$

Базы правил вывода или базы знаний для этой сети разрабатывались за два шага. На первом шаге были созданы базы знаний для выполнения промежуточных выводов, каждая из которых работает с приведенными выше подгруппами входных данных. Результатами промежуточного вывода будут являться следующие: переменные, используемые далее для получения окончательного вывода, которые приведены в таблице 1.

При рассмотрении структуры сети ANFIS, приведенной на рисунке 1, видно, что в слое 2 степени истинности предпосылок каждого правила, входящего в базу знаний этой сети, определяются как произведение входов, что требует обработки всех входных переменных. Работа такого слоя возможна при наличии в этой сети базы знаний, работающей одновременно

со всеми входными переменными. Это усложняет составление такой базы знаний при достаточно большом количестве входных факторов из-за необходимости разработки достаточно сложных правил вывода, работающих с большим количеством входных переменных.

Таблица 1 – Переменные промежуточного вывода

Переменная	Факторы, представляемые переменной
Y_1	Экономические
Y_2	Производственные
Y_3	Организационные
Y_4	Социальные

Чтобы избежать составления и работы со сложными правилами вывода, следует использовать правила вывода, состоящие из двух частей или ступеней. Первая ступень правила вывода при таком подходе представляет собой промежуточный вывод по той или иной подгруппе входных факторов. Вторая же ступень обеспечивает обработку результатов промежуточных выводов по всем подгруппам рассматриваемых данных. Этот подход требует применения в рассматриваемой сети четырех баз правил промежуточного вывода по числу подгрупп входных данных, представляющих собой первую ступень, и одной базы правил для выполнения окончательного вывода, представляющих собой вторую ступень.

Реализация такого подхода требует внесения изменений в структуру сети ANFIS. Эти изменения показаны на рисунке 2. Теперь слой под номером 2, в котором производятся вычисления значений степени истинности предпосылок по каждому используемому правилу, должен содержать два подслоя. Каждый из этих подслоев обеспечивает работу первой или второй ступени правил.

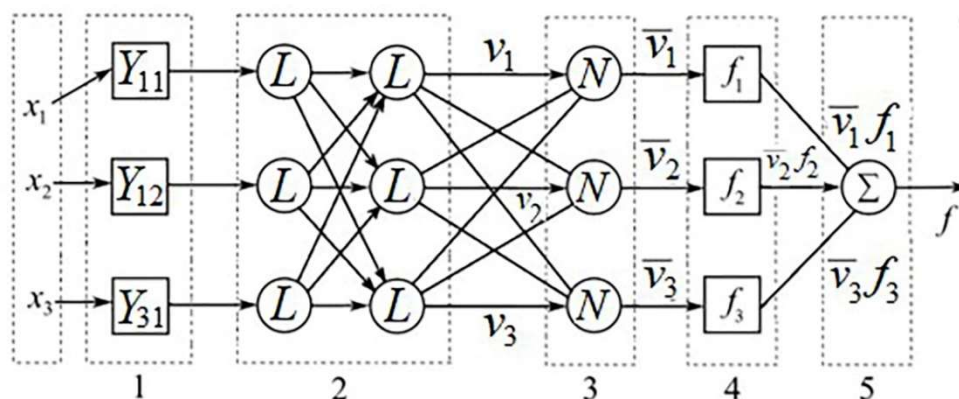


Рисунок 2 – Предлагаемая структура сети ANFIS

Функционирование такого слоя выполняется в следующем порядке: первоначально рассчитываются степени истинности предпосылок каждого правила первой ступени, отражающие влияние входных факторов каждой подгруппы на выходные значения переменных промежуточного вывода. После этого по результирующим данным первого подслоя рассчитываются степени истинности, применяемые во второй ступени базы правил вывода.

Для генерации новых правил вывода (знаний) применяем следующий метод: если сеть имеет n входов или же n применяемых в работе сети переменных, представляемых далее для упрощения записи векторным массивом x , и только один выход y (в рассматриваемом случае – это значение оценки эффективности потребления электрической энергии), то такой сети соответствует определенная функция, выражаемая следующей формулой [20]:

$$y = f(x) + \varepsilon, \tag{2}$$

где $f(x)$ – неизвестная функция;
 ε – случайная помеха.

Далее, если в исследуемой системе тем или иным способом выполнить исследования протекающих в ней процессов с получением N пар значений переменных x и y , то в этом случае можно создать новые правила вывода, согласно алгоритму, изложенному в [20].

Непосредственно модификация метода генерации новых правил представляет собой изложенные далее действия.

На шаге 3 алгоритма, приведенного в [20], осуществляется проверка истинности неравенства, рассчитываемого как:

$$|y - y_*| > d, \quad (3)$$

где y_* – прогнозируемое значение функции y , определенное на предыдущем шаге рассматриваемого алгоритма центроидным методом;

d – некоторая заранее принятая величина, устанавливающая допустимость выполнения данного неравенства (3).

Если это неравенство выполняется, то сформировано новое правило, которое может быть занесено в базу знаний, что означает автоматическое получение нового знания. Но следует учитывать, что при автоматическом получении новых правил могут генерироваться в том или ином количестве правила, имеющие малую ценность, и добавление их в базу знаний приведет в основном к увеличению объема этой базы и не скажется на эффективности работы гибридной сети. Чтобы избежать нецелесообразного расширения базы знаний, следует выполнить проверку новых правил на целесообразность их дальнейшего использования с привлечением опыта экспертов, участвующих в разработке данной гибридной сети. Для этой цели необходимо приведенную формулу (3) изменить к следующему виду:

$$|y - y_*| > d \cdot k, \quad (4)$$

где k – вес рассматриваемого нового правила, определяемый на основе оценок экспертов.

Предлагаемая модификация метода получения новых правил в гибридной сети позволяет включать в базу знаний действительно важные правила вывода, использование которых приводит к повышению обоснованности оценок эффективности энергопотребления промышленных предприятий.

Заключение

В данной статье рассмотрено применение нечеткой логики и нейронных сетей для создания модели исследования процессов использования электроэнергии на промышленных предприятиях для получения значений оценки эффективности этих процессов с помощью гибридной или нечеткой нейронной сети. Такая сеть построена на основе иерархического подхода в разработке и применении баз правил нечеткого вывода, что обеспечивает высокую эффективность работы экспертов при создании сети вследствие небольших объема информации, с которым работает каждый эксперт, привлекаемый для создания гибридной сети. Автоматическое создание новых правил вывода с последующим отбором для включения в базу позволяет повысить обоснованность оценки энергоэффективности промышленных предприятий.

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/fr.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., Теремов 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/mmph180303.
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 // Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika. 2017. T. 16. Vyp. 1. S. 82–92. doi: 10.24891/ea.16.1.82.
2. Lebedev V.A. Eksergeticheskiy 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 // Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika. 2019. T. 18, № 1. S. 22–39. doi: 10.24891/ea.18.1.22.
4. Koksharov V.A. Metodicheskiy podkhod otsenki prioritetrov 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. C. 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 naukoymkiye 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. Nguyen Dang Min. Vliyaniye obuchayushchikh vyborok na protsess obucheniya adaptivnykh neyro-nechetkikh 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. Savenko 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

Kudolina 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.А. ЧЕРНЫШОВ, Г.В. ЛУКЬЯНОВ, 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 решения, 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.*

Введение

История развития воздушных сетей 6-10 кВ берет свое начало более века назад, изолированный режим работы их нейтрали был принят с целью обеспечения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, в случаях возникновения однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ). И, даже не смотря, на формирования опасного для людей и животных шагового напряжения, зона действия которого распространялось на 8-10 метров от возникновения ОЗНЗ, а также на повышение напряжения относительно земли в $\sqrt{3}$ раз, на неповрежденных фазах электрически связанной сети [1], данный выбор был оправдан тем, что на первичных обмотках потребительских подстанций, при возникновении ОЗНЗ, междуфазное напряжение не изменялось, что в конечном итоге, давало возможность сельскохозяйственному оборудованию, питающемуся от этих подстанций и дальше работать в штатном режиме. И, хотя, с увеличением времени существования перенапряжений в электрической сети увеличивалась и вероятность возникновения режима двойного замыкания на землю (ДЗНЗ), которое в свою очередь сопровождалось нарушением электроснабжения потребителей, малая на тот момент времени протяженность и разветвленность данных сетей, а также высокий запас их прочности позволяли своевременно определить место возникновения ОЗНЗ и устранить его задолго до наступления негативных последствий. На сегодняшний день ситуация кардинально изменилась. Современные распределительные сети 6-10 кВ разрослись, их суммарная протяженность составляет более 1 миллиона километров. Очевидно, что в таких условиях классические способы отыскания повреждения являются малоэффективными. И даже современные инженерно-технические решения такие как: применение интеллектуальных систем управления и контроля, выполненных на базе цифровых технологий [2], высокоэффективная коммутация токов в вакууме [3], применение БПЛА для тепловизионного мониторинга ВЛЭП [4] не могут в должной степени обеспечить нормальную работу данных сетей. Усугубляет ситуацию и тот факт, что согласно действующим правилам организации технического обслуживания и ремонта объектов энергетики [5], процесс отыскания места повреждения изоляции на линиях 6-10 кВ производится исключительно при снятом напряжении. С одной стороны, определение места повреждения при снятом напряжении устраняет негативное влияние перенапряжений на линейную изоляцию, а также в полной мере обеспечивает безопасность для оперативно выездной бригады, однако с другой стороны теряется основное преимущество данных сетей – обеспечение бесперебойности работы потребителей. Статистика аварийности в период с 2005 года по 2020 год, представленная на рисунке 1 [6] свидетельствует о тенденции увеличения числа отключений линии по причине возникновения ОЗНЗ. А согласно материалам «Системного оператора» к концу 2021 года количество аварий увеличилось еще на 3% [7].

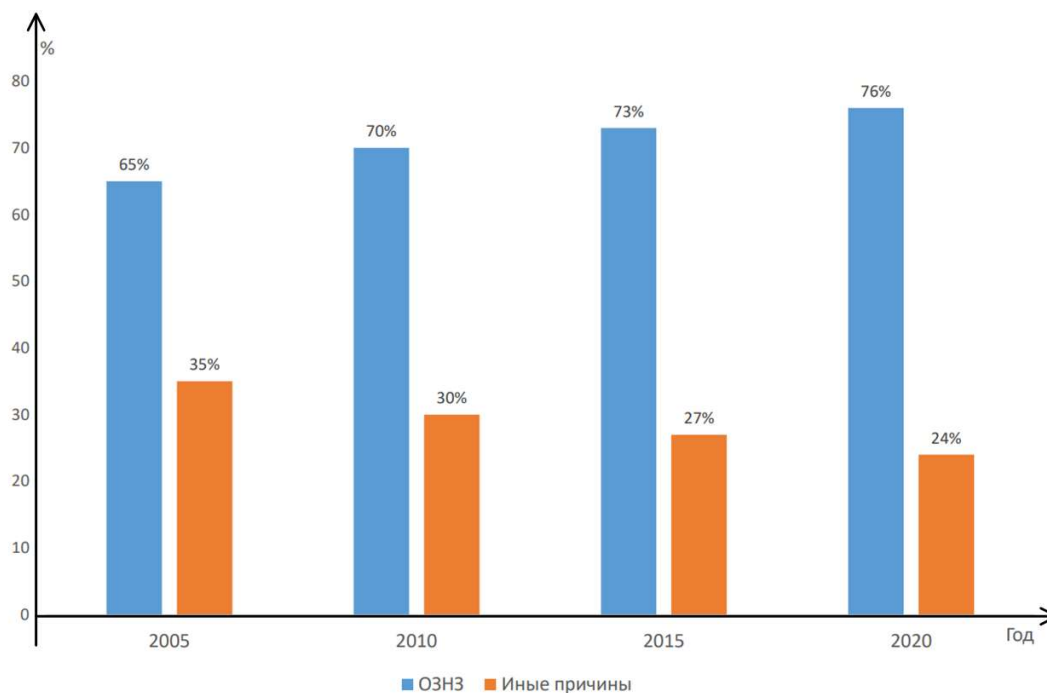


Рисунок 1 – Процентное распределение между ОЗНЗ и иными повреждениями в воздушных распределительных сетях 6-10 кВ в период с 2005 по 2020 г.г

Также такое большое количество повреждений обусловлено высокой степенью износа, статистика которой представлена на рисунке 2 [8].

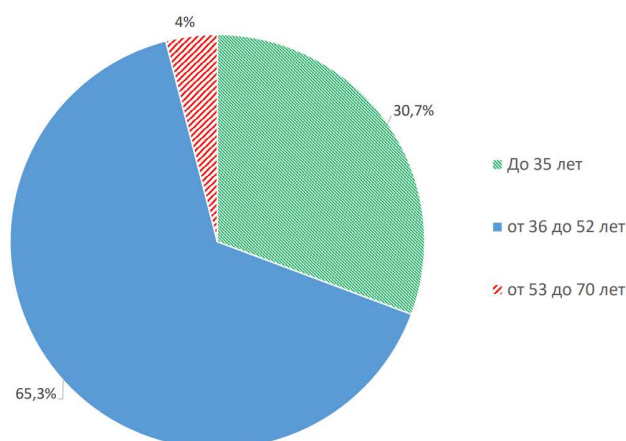


Рисунок 2 – Процентный показатель износа воздушных распределительных сетей 6-10 кВ

Вопрос повышения надежности функционирования воздушных электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением 6-10 кВ в условиях возникновения ОЗНЗ на сегодняшний день является особенно актуальным [9]. Это обосновано следующими основными факторами: во-первых, средняя продолжительность эксплуатации данных сетей в значительной степени превосходит установленный для них нормативный срок эксплуатации, вследствие чего они имеют высокую степень износа изоляции [10]; во-вторых, данные сети зачастую питают ответственных агропромышленных потребителей, нарушение электроснабжения которых влечет за собой серьезные экономические последствия [11]; в третьих автоматическое отключение ВЛЭП при ДЗНЗ приводит к снижению остаточного ресурса дорогостоящих коммутационных аппаратов – вакуумных выключателей [12].

Основная часть

Предлагаемое инженерно-техническое решение относится к релейной защите и автоматике электрических сетей и направлено на повышение надежности функционирования электрических сетей с изолированной нейтралью с ОЗНЗ [13]. На рисунке 3 изображена

принципиальная схема перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сети с изолированной нейтралью.

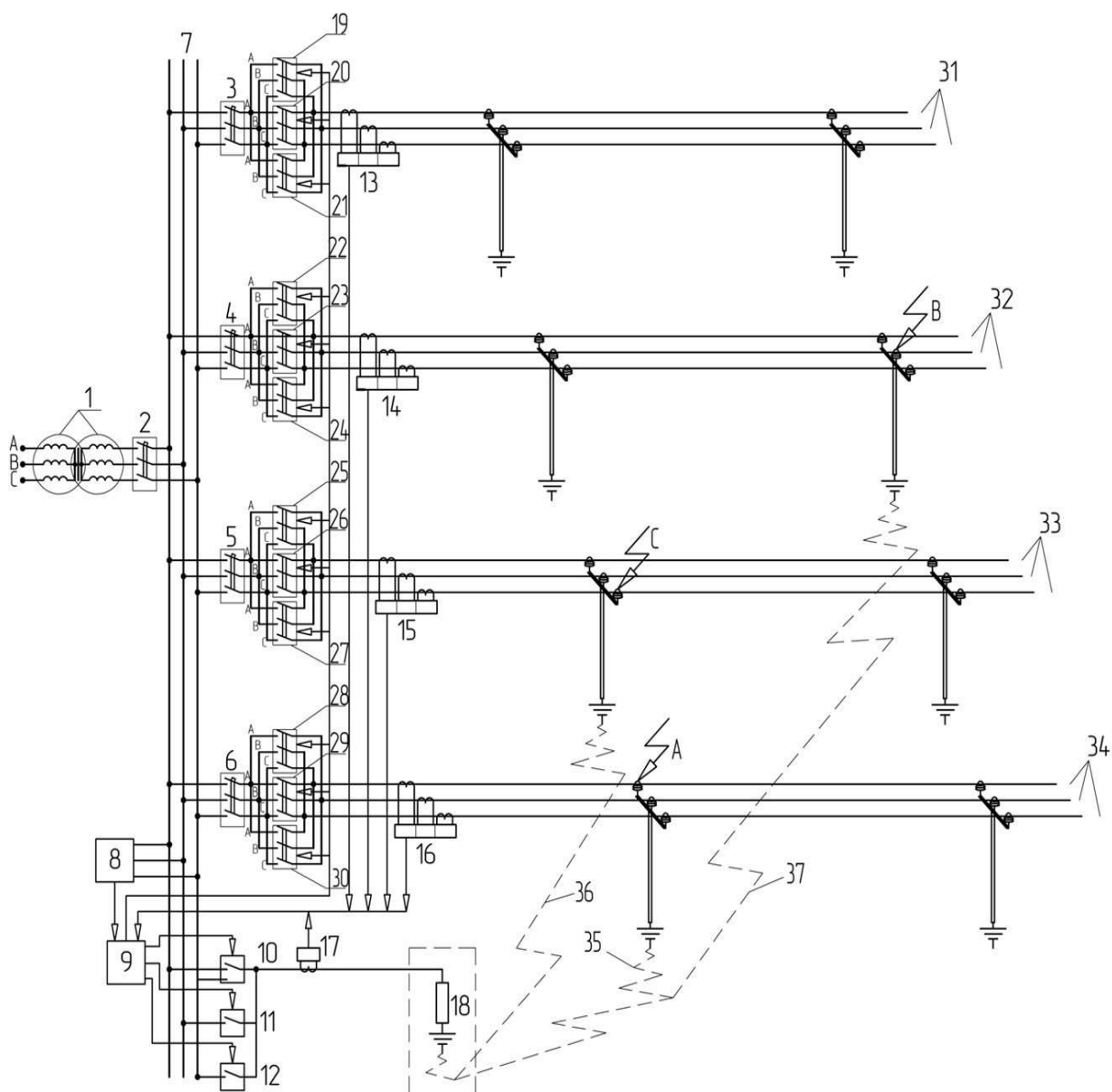


Рисунок 3 – Схема перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сети с изолированной нейтралью

Схема (см. рисунок 3) содержит силовой понижающий трансформатор 1 с фазами А, В и С, подключенный к высоковольтной питающей сети, напряжением 35(110) кВ, коммутационные аппараты 2 – 6 автоматической защиты, шины 7 низковольтного напряжения 6(10) кВ, устройство 8 неселективного контроля изоляции, электронный блок 9 автоматического управления, однофазные выключатели 10 – 12, датчики 13 – 17 тока, низкоомный заземляющий резистор 18, дистанционно управляемые коммутационные аппараты 19 – 30, ВЛЭП 31 – 34. На схеме также изображены пути 35 и 36 кратковременного протекания тока искусственного ДЗНЗ, путь 37 кратковременного протекания тока ДЗНЗ, устойчивое повреждение фазы А (ОЗНЗ), слабый развивающийся дефект фазы С, устойчивое повреждение фазы В (ДЗНЗ). Данная схема работает следующим образом: При возникновении устойчивого ОЗНЗ любой из фаз на одной из ВЛЭП электрической сети с изолированной нейтралью, например, устойчивое повреждение фазы А (ОЗНЗ) ВЛЭП 34, а также слабого, развивающегося дефекта изоляции одной из фаз, разноименных с фазой А, на

любой другой ВЛЭП, например слабый развивающийся дефект фазы С ВЛЭП 33, устройство 8 неселективного контроля изоляции, подключенное к шинам 7 низковольтного напряжения, регистрирует появление напряжения нулевой последовательности и формирует сигнал. Сигнал поступает на блок 9 автоматического управления, который поочередно выдает команду однофазным выключателям 10 – 12 на поочередное кратковременное включение на землю фаз шин 7 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 18 для создания искусственного двойного замыкания на землю по путям 35, 36 кратковременного протекания тока искусственного ДЗНЗ. При этом в отходящей от источника питания ВЛЭП 34 включенной через коммутационный аппарат 29 и имеющей устойчивое повреждение фазы А (ОЗНЗ), будет фиксироваться датчиком 16 тока высокое увеличение тока в фазе А в момент поочередного кратковременного включения одной из фаз (В или С) шин 7 низковольтного напряжения на землю через низкоомный заземляющий резистор 18, а в отходящей от источника питания ВЛЭП 33, включенной через коммутационный аппарат 26 и имеющей слабый развивающийся дефект изоляции фазы С будет фиксироваться датчиком 15 тока среднее или низкое увеличение тока в фазе С в момент поочередного кратковременного включения одной из фаз (А или В) шин 7 низковольтного напряжения на землю через низкоомный заземляющий резистор 18. При одновременном поступлении информации с датчиков 15 и 16 тока на блок 9 автоматического управления последний оперативно формирует сигнал коммутационному аппарату 29 оставаться во включенном положении, сохраняя при этом порядок чередования фаз ВЛЭП 34, а коммутационному аппарату 26 отключиться и включиться вместо него коммутационному аппарату 27, изменяющему порядок чередования всех трех фаз на ВЛЭП 33 таким образом, что на ее проводник с низким увеличением тока, будет подключена фаза А с устойчивым ОЗНЗ. Не получив сигнала с датчика 13 тока об увеличении тока в одной из фаз ВЛЭП 31, не имеющей устойчивых повреждений и развивающихся дефектов изоляции, блок 9 автоматического управления формирует сигнал коммутационному аппарату 20 оставаться во включенном положении. При возникновении устойчивого ДЗНЗ на одной из ВЛЭП с повреждением изоляции ее фаз С или В, например, устойчивое повреждение фазы В (ДЗНЗ) на ВЛЭП 32, датчиками 14 – 16 тока будет зафиксировано высокое увеличение тока в фазе В ВЛЭП 32, а также в фазе А ВЛЭП 34 (путь 36 кратковременного протекания тока естественного ДЗНЗ) и среднее или низкое в фазе А ВЛЭП 33 электрически связанной сети. Получив сигнал с датчиков 14 – 16 тока, блок 9 автоматического управления форсированно формирует сигнал коммутационному аппарату 23 отключиться и включиться вместо него коммутационному аппарату 22, изменяющему порядок чередования всех трех фаз на ВЛЭП 32 таким образом, чтобы на ее проводник с высоким увеличением тока была подключена фаза А с устойчивым ОЗНЗ. Для успешной реализации данного способа необходимо чтобы аппараты 3 – 6 автоматической защиты ВЛЭП 31 – 34 были отстроены по времени срабатывания таким образом, чтобы за время изменения порядка чередования всех трех фаз на ВЛЭП с развивающимся или устойчивым ДЗНЗ не происходило преждевременного их срабатывания.

Заключение

Рассмотрены основные проблемы, связанные с современными воздушными распределительными сетями 6-10 кВ, работающими с изолированным режимом нейтрали. Представленные статистические данные аварийности и износа данных сетей, наглядно показывают необходимость разработки новых схемотехнических решений, обеспечивающих возможность их длительной и бесперебойной работы при повреждениях изоляции. Предложенный способ повышения надежности их функционирования, заключающийся в переводе устойчивого и развивающегося ДЗНЗ, разнесенного по разным ВЛЭП 6-10 кВ (без их отключения) в ОЗНЗ каждой из ВЛЭП 6-10 кВ, позволяет в значительной степени повысить надежность электроснабжения агропромышленных потребителей.

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 MEI, 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.Turgenev OSU. Authors: Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Darov A.S.

Chernyshov Vadim Alekseevich
 FGBOU VO "OSU named after
 I.S. Turgenev", 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.
 Turgenev", 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 Gennadijevna
 FGBOU VO "OSU named after I.S.
 Turgenev", 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: tgkoroleva@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

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

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