

ISSN 2073-7408

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

1 (369) 2025

## 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 редколлегии:

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

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

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

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

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

Зубанинов 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)

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

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

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

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

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

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

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

Старовойтов Э.Н. 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:

Тюхтя А.В. канд. техн. наук

## Адрес редакции

302030, Орловская обл., г. Орёл, ул.

Московская, 34

+7 (905) 169 88 99

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

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

Зарег. в Федеральной службе по  
надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-67029  
от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504

по объединённому каталогу

«Пресса России»

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

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

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 K1.

## Содержание

### Колонка главного редактора

<i>Приветственное слово участникам XXII международной научно-практической конференции "Энерго- и ресурсосбережение - XXI век" Зомитевой Галины Михайловны, и.о. ректора ФГБОУ ВО «Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева».....</i>	5
<i>Шестьдесят лет кафедре приборостроения, метрологии и сертификации Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева поздравление главного редактора журнала д.т.н., профессора С.Ю. Радченко.....</i>	6
<i>Подмастерьев К.В. Шестьдесят лет плодотворной научной деятельности в области контроля, диагностики, общего и медицинского приборостроения.....</i>	7

### Машиностроительные технологии и оборудование

<i>Неменко А.В., Никитин М.М. Оценки качества изделий с поверхностями второго порядка...</i>	16
<i>Бут А.Ю. Показатель эффективности способов изготовления цельноштампованных тройников.....</i>	23

### Машиноведение и мехатроника

<i>Утенков В.М., Иванов В.А., Гончаров А.А. Моделирование положения вращающихся цементных печей с целью определения неисправностей.....</i>	33
<i>Кононенко А.С., Нотфуллин И.Ф. Теоретическое обоснование применения уплотнительных элементов для обеспечения герметичности фланцевых соединений.....</i>	40

### Приборы, биотехнические системы и технологии

<i>Буркова Е.В., Бурков Д.В., Осадчая Л.И., Буркова С.Д. Эффективность геостанций для отопления и горячего водоснабжения на основе отработанных карьеров.....</i>	46
<i>Жидков А.В., Подмастерьев К.В., Денисов Д.В. Исследование импеданса головного мозга..</i>	54

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

<i>Воронов Г.Г., Соляник А.И., Клейменова Н.Л., Назина Л.И. Идентификация и анализ возможностей и рисков внешних и внутренних факторов при постановке целей в области качества.....</i>	61
<i>Георгиевская Е.В., Георгиевский Р.Н., Георгиевский Н.В. Структурирование базы данных по контролю состояния металла энергооборудования.....</i>	69
<i>Квас Е.С., Кузьменко В.П., Солёный С.В. Алгоритм контроля качества и стабилизации параметров потока жидкостей в роботизированных системах розлива.....</i>	77
<i>Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С., Солдаткин В.С. Информационно-измерительная система воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.....</i>	88
<i>Корниенко А.В., Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Обзор подходов к определению «надежность оборудования». Классификация технологического оборудования в зависимости от уровня надежности.....</i>	98

### XXII международная научно-практическая конференция "Энерго- и ресурсосбережение - XXI век"

<i>Качанов А.Н., Тимохин В.А., Качанов Н.А. Оценка энергоэффективности работы индукционной установки для сушки шпона.....</i>	112
<i>Макаров А.Н., Павлова Ю.М. Преобразование потоков теплового излучения дуг в потоки конвективные и теплопередачи в ванне металла электродуговых сталеплавильных печей.....</i>	118
<i>Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б. Сравнение энергетических показателей излучательных электротехнологических установок при питании током сложной формы и током промышленной частоты.....</i>	127
<i>Решетняк С.Н. К вопросу обоснования критериев рационализации систем электроснабжения угольных шахт.....</i>	135
<i>Чернышов В.А., Королева Т.Г., Астафьев Н.А. Методика расчета тока искусственного двойного замыкания на землю в воздушных электрических сетях 10 кВ с изолированной нейтралью.....</i>	140
<i>Салихов Р.Р., Рахманкулов Ш.Ф., Гарифуллин М.Ш., Воркунов О.В. Моделирование температурных режимов работы троллейных шинопроводов.....</i>	148
<i>Качанов А.Н., Чернышов В.А., Семенухин Д.И. Способ оперативного переключения двойных замыканий на землю на однофазные в воздушных электрических сетях 10 кВ с изолированной нейтралью.....</i>	160
<i>Баракин Н.С., Стрижков И.Г., Волошин А.П., Коренков Д.А. Имитационное моделирование электроснабжения дождевальной машины в Simintech.....</i>	166

<i>Барышева Н.Н., Барышев Д.Д., Музоватова Я.Ю. Применение интеллектуальных технологий для оценки эффективности послеуборочной обработки семян.....</i>	172
<i>Гаранин М.Е., Федянин В.Я. Обработка массива данных температурной волны в приповерхностных слоях земли для повышения эффективности теплонасосных систем..</i>	180
<i>Титов Е.В., Сошников А.А., Куликова Л.В., Соловской А.С. Оценка систем санитарно-гигиенического нормирования в области контроля электромагнитной обстановки на коммунально-бытовых объектах.....</i>	186
<i>Никольский О.К., Куликова Л.В., Суринский Д.О., Басуматорова Е.А. Универсальная система защиты объектов АПК от вредителей как инструмент определения относительной энергоемкости продукции.....</i>	195
<i>Казаков Ю.Н. Энергетические характеристики конических подшипников жидкостного трения.....</i>	200
<i>Беликов Р.П., Паришутин И.Г., Филиппова-Глебова А.И., Зелюкин В.И. Проблемы и перспективы развития цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем в концепции распределенной энергетики.....</i>	207
<i>Марков В.В., Углова Н.В. Применение статистических инструментов управления качеством продукции при проведении анализа больших данных о причинах дефектов электрооборудования.....</i>	213
<i>Подмастерьев К.В., Марков В.В. Контроль технического состояния механизма с использованием математической модели электрического сопротивления узла трения в виде совокупности фрикционных контактов.....</i>	219
<i>Щемелева Ю.Б. Качество данных как фактор успешности внедрения технологий искусственного интеллекта в электроэнергетике.....</i>	228
<i>Малый Д.О., Матюхин С.И. Современные технические решения в конструкции IGBT модулей высокой мощности.....</i>	234
<i>Тарасов Я.О. Архитектура современного драйвера силовых IGBT ключей.....</i>	245
<i>Матюхин С.И., Мурко А.С., Васяев А.А., Титушкин Д.А. Зависимость параметров обратного восстановления силового р-и-п диода от силы прямого тока и скорости его спада в цепи с индуктивной нагрузкой.....</i>	258

## 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)

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

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

Starovoitov A.I. 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/fipptt>

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

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

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossii» 29504

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

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

© Orel State University, 2025

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

### Editor's column

<i>Welcoming speech to the participants of the XXII international scientific and practical conference "Energy and resource saving - XXI century" by Galina Mikhailovna Zomiteva, acting rector of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Oryol State University named after I.S. Turgenev" .....</i>	5
<i>Sixty years of the Department of Instrument Engineering, Metrology and Certification of Oryol State University named after I.S. Turgenev congratulations from the editor-in-chief of the journal, Doctor of Technical Sciences, Professor S.Yu. Radchenko.....</i>	6
<i>Podmasteriev K.V. Sixty years of fruitful scientific activity in the field of control, diagnostics, general and medical instrument engineering.....</i>	7

### Machine-building technologies and equipment

<i>Nemenko A.V., Nikitin M.M. Quality estimations of products with second-order surfaces....</i>	16
<i>But A.Yu. Performance indicator of manufacturing methods for solid-stamped tees.....</i>	23

### Machine Science and Mechatronics

<i>Utenkov V.M., Ivanov V.A., Goncharov A.A. Simulation of the position of rotating cement kilns in order to identify malfunctions.....</i>	33
<i>Kononenko A.S., Notfullin I.F. Theoretical justification of the use of sealing elements to ensure the tightness of flange connections.....</i>	40

### Devices, biotechnical systems and technologies

<i>Burkova E.V., Burkov D.V., Osadchaya L.I., Burkova S.D. Efficiency of solar plants for heating and hot water supply based on decomposed quarry piles.....</i>	46
<i>Zhidkov A.V., Podmasteryev K.V., Denisov D.V. Brain impedance study .....</i>	54

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

<i>Voronov G.G., Solyanik A.I., Kleimenova N.L., Nazina L.I. Identification and analysis of opportunities and risks of external and internal factors in quality goals setting.....</i>	61
<i>Georgievskaya E.V., Georgievsky R.N., Georgievsky N.V. Structuring database for metal condition monitoring of power equipment.....</i>	69
<i>Kvas E.S., Kuzmenko V.P., Soleniy S.V. Quality control and flow parameter stabilization algorithm in robotic liquid dispensing systems.....</i>	77
<i>Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Soldatkin V.S. Information and measuring system of air signals of an aircraft based on ultrasonic method for monitoring parameters of incident air flow.....</i>	88
<i>Kornienko A.V., Martynets E.R., Leventsov V.A. Overview of approaches to the definition of "equipment reliability". Classification of technological equipment depending on the reliability level.....</i>	98

### XXII International scientific and practical conference "Energy and resource saving - XXI century"

<i>Kachanov A.N., Timokhin V.A., Kachanov N.A. Assessment of the energy efficiency of an induction veneer drying unit.....</i>	112
<i>Makarov A.N., Pavlova Y.M. Conversion of thermal radiation fluxes of arcs into convective and heat transfer fluxes in a metal bath of electric arc steelmaking furnaces.....</i>	118
<i>Ptitsyna E.V., Ptitsyn D.V., Kuvaldin A.B. Comparison of energy indicators of radiative electrotechnological installations powered by complex waveform current and industrial frequency current.....</i>	127
<i>Reshetnyak S.N. On the issue of substantiation of rationalization criteria coal mine power supply systems.....</i>	135
<i>Chernyshov V.A., Koroleva T.G., Astafiev N.A. Method for calculating current of artificial double ground fault in overhead electrical networks 10 kV with an isolated neutral .....</i>	140
<i>Salikhov R.R., Rakhmankulov Sh.F., Vorkunov O.V., Garifullin M.Sh. Study of temperature conditions of trolley busbars operation.....</i>	148
<i>Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Chshemenikhin D.I. Method of operative switching of double earth faults to single-phase ones in 10 kV overhead electric networks with isolated neutral.....</i>	160
<i>Barakin N.S., Strizhkov I.G., Voloshin A.S., Korenkov D.A. Simulation modeling of sprinkler machine power supply in Simintech.....</i>	166

<i>Barysheva N.N., Baryshev D.D., Muzovatova Y.Yu. Application of intelligent technologies to assess the post-harvest seed treatment effectiveness.....</i>	172
<i>Garanin M.E., Fedyanin V.Ya. Processing temperature wave data in the earths surface layers to improve the efficiency of heat pump systems.....</i>	180
<i>Titov E.V., Soshnikov A.A., Kulikova L.V., Solovskoy A.S. Assessment of sanitary-hygienic rationing systems in the field of electromagnetic environment control at municipal facilities .....</i>	186
<i>Nikolsky O.K., Kulikova L.V., Surinsky D.O., Basumatorova E.A. The universal system of protection of agricultural facilities from pests as a tool for determining the relative energy intensity of products .....</i>	195
<i>Kazakov Yu.N. Energy characteristics of conical fluid film bearings.....</i>	200
<i>Belikov R.P., Parshutina I.G., Filippova-Glebova A.I., Zelyukin V.I. Problems and prospects of development of digital intelligent local energy systems in the concept of distributed energy.....</i>	207
<i>Markov V.V., Uglova N.V. Application of statistical tools of product quality management in conducting big data analysis on the causes of electrical equipment defects.....</i>	213
<i>Podmasreryev K.V., Markov V.V. Control of the technical condition of the mechanism using a mathematical model of the electrical resistance of a friction unit in the form of a set of frictional contacts.....</i>	219
<i>Shchemeleva Y.B. Data quality as a factor for the successful implementation of artificial intelligence technologies in the energy sector.....</i>	228
<i>Malyi D.O., Matyukhin S.I. Modern design solutions in high power IGBT modules.....</i>	234
<i>Tarasov Y.O. Architecture of the modern driver of power IGBT keys.....</i>	245
<i>Matyukhin S.I., Murko A.S., Vasyaev A.A., Titushkin D.A. Dependence of the reverse recovery parameters of a power p-n diode on the forward current and the current drop rate in the circuit with inductive load .....</i>	258

**Приветственное слово участникам XXII Международной научно-практической конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК" Зомитевой Галины Михайловны, и.о ректора ФГБОУ ВО «Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева», председателя организационного комитета конференции, кандидата экономических наук, доцента, почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации**



Уважаемые участники XXII Международной научно-практической конференции "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК"(МНПК-2024), позвольте выразить вам глубочайшее уважение и искреннюю благодарность за участие в этом действительно значимом мероприятии. Ваше присутствие, активная работа, представленные доклады и готовность к открытому и плодотворному обмену опытом – это ключевые факторы успеха нашей конференции и несомненный вклад в решение острейших проблем энерго- и ресурсосбережения, стоящих перед человечеством в XXI веке.

Хочется отметить, что МНПК-2024 – это не просто очередное научно-практическое мероприятие международного уровня. За 24 года своего существования она превратилась в устоявшуюся, традиционную и авторитетную площадку для диалога ученых, инженеров, представителей бизнеса и государственных структур, успешно функционирующую на базе Института приборостроения, автоматизации и информационных технологий Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева.

Инициатором и движущей силой этого важного проекта, безусловно, является кафедра электрооборудования и энергосбережения ОГУ им. И.С. Тургенева, которая за эти годы не только сформировала уникальную экспертную среду, объединяющую ведущих специалистов в области энергоэффективности, но и методично развивает мультидисциплинарный подход к решению проблем энергосбережения, интегрируя знания в области энергетики, электроники, информационных технологий, материаловедения и экономики. Это позволяет рассматривать вопросы энергоэффективности не изолированно, а в контексте комплексного развития общества и устойчивого экономического роста.

В этом году программа конференции охватывает широкий спектр теоретических вопросов, включающих: разработку и внедрение энергоэффективного оборудования для промышленности и бытового сектора; цифровизацию энергетики и электротехнических систем; использование возобновляемых источников энергии; совершенствование систем управления энергопотреблением; разработку и внедрение интеллектуальных сетей; экономические и социальные аспекты энергосбережения; и многое другое. Особое внимание уделяется и обсуждению практических аспектов внедрения энергосберегающих технологий, а также проблем и препятствий, возникающих на пути их реализации.

Уверена, что данная конференция станет ярким событием в научной жизни каждого из ее участников и даст сильный импульс, направленный на обеспечение дальнейшего устойчивого развития науки и техники в области энерго- и ресурсосбережения.

Желаю всем участникам МНПК-2024 плодотворной творческой работы и интересного общения, пусть наша конференция станет для Вас источником новых идей, деловых контактов и профессионального роста!

**ШЕСТЬДЕСЯТ ЛЕТ КАФЕДРЕ  
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ  
ОРЛОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМ. И.С. ТУРГЕНЕВА**

Кафедра приборостроения, метрологии и сертификации Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева отмечает юбилей – 60 лет со дня основания. Шестьдесят лет кафедра готовит и успешно выпускает дипломированных специалистов, бакалавров, магистров в области приборостроения (направления 12.03.01, 12.04.01), биотехнических систем и технологий (направления 12.03.04, 12.04.04), управления качеством (27.03.02, 27.04.02), проводит комплексные научные исследования и осуществляет подготовку кандидатов и докторов наук в области методов и приборов контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (специальность 2.2.8), приборов систем и изделий медицинского назначения (2.2.12).

Высокий уровень подготовки выпускников подтверждается ежегодными призовыми местами, которые они занимают на Всероссийском конкурсе выпускных квалификационных работ, проводимом Федеральном УМО вузов России по УГСНП 12.00.00 «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», а также большой востребованностью выпускников на рынке труда.

Кафедра активно работает и в области дополнительного профессионального образования, реализуя целый ряд авторских программ повышения квалификации по актуальным темам в области приборостроения, метрологии, стандартизации, медицинской техники и управления качеством, представляющим интерес для специалистов предприятий и организаций не только Орловского, но и других регионов. Среди слушателей курсов представители Москвы, Тулы, Курска, Брянска, Калуги, Пскова, Калининграда, Череповца и других городов.

На кафедре сформирована и успешно развивается мощная научная школа в области методов и средств контроля, диагностики, мониторинга и прогнозирования состояния технических и биологических объектов. Защищено около пятидесяти кандидатских и несколько докторских диссертаций. При этом по направлению электрических методов и средств неразрушающего контроля и диагностики данная школа признается одной из ведущих в России, что подтверждается подготовкой коллективом кафедры и участием в подготовке ряда справочников, изданных не только в центральных издательствах России, но и за рубежом.

В последние годы бурное развитие получает научное направление, связанное с разработкой перспективных методов мультимодальной оптической диагностики микроциркуляторно-тканевых систем организма человека. Данное направление реализуется созданным в университете Научно-технологическим центром биомедицинской фотоники (НТЦ Биомедицинская фотоника). Признание высокого уровня работ в этом направлении подтверждается публикациями результатов в высокорейтинговых научных изданиях, а также тем, что коллективом центра ежегодно выполняются проекты по грантам правительства Российской Федерации (мегагрантам), грантам РНФ по программам «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами», «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых», «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» и др. Следует отметить, что ведущие ученые НТЦ являются выпускниками кафедры приборостроения, метрологии и сертификации и ведут учебный процесс на кафедре.

Более подробно анализ достижений и перспектив развития научной деятельности кафедры приборостроения, метрологии и сертификации рассмотрен в представленной ниже статье «Шестьдесят лет плодотворной научной деятельности в области контроля, диагностики, общего и медицинского приборостроения», а последние результаты исследований изложены в ряде статей этого и последующих номеров журнала.

Главный редактор журнала  
И.о.проректора ОГУ им. И.С. Тургенева  
по научно-технологической деятельности и аттестации научных кадров  
д.т.н., профессор  
С.Ю. Радченко

ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В.

## ШЕСТЬДЕСЯТ ЛЕТ ПЛОДОТВОРНОЙ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ, ОБЩЕГО И МЕДИЦИНСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

**Аннотация.** Представлен краткий анализ научных направлений деятельности кафедры приборостроения метрологии и сертификации Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева, которой исполнилось 60 лет со дня образования. Отмечены основные достижения и перспективы развития.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, диагностика, электрические методы, узлы трения, трибомониторинг, биомедицинская фотоника, мультимодальная оптическая диагностика.

Кафедра приборостроения, метрологии и сертификации Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева отмечает свое шестидесятилетие.

На кафедре сформирована и успешно развивается мощная научная школа, основным направлением деятельности которой является разработка электрических методов и средств диагностирования, неразрушающего контроля и прогнозирования состояния веществ, материалов и изделий, технических и биологических объектов. Подтверждением признания достижений этой школы является то, что ведущие ученые кафедры привлекались к подготовке нескольких справочников [1-4], среди которых книга «Электрический контроль» пятого тома фундаментального восьмитомного справочного издания «Неразрушающий контроль» (издательство Машиностроение) [3], написание которой было поручено коллективу кафедры.

Характеризуя кратко научные достижения коллектива кафедры, отметим лишь те работы, которые доведены до практической апробации, внедрения и защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Одним из базовых научных направлений исследований, успешно развивающимся до настоящего времени, является разработка электрических методов и реализующих их средств трибомониторинга и трибодиагностики. Данное направление сформировано в 1979 году д.т.н., профессором С.Ф. Корндорфом, в настоящее время им руководит д.т.н., профессор К.В. Подмастерьев. Сущность этого направления заключается в поиске решений проблемы получения объективной достоверной инструментальной информации о фактическом состоянии различных деталей, узлов трения и изделий в целом электрическими неразрушающими методами в процессе производства, эксплуатации, сервисного обслуживания и ремонта машин и механизмов. При реализации электрических методов о состоянии объекта судят по флуктуациям его электрических параметров или генерируемых при его работе электрических сигналов. В этом случае объективная количественная информация о состоянии трибосопряжения поступает непосредственно из зон трения его деталей в форме электрического сигнала, удобного для дальнейшего преобразования и обработки, что позволяет создавать относительно недорогие, практически безынерционные и безопасные средства контроля, обеспечивающие решение различных диагностических и прогностических задачи для различных объектов.

Для проведения комплексных исследований разработаны и изготовлены универсальные экспериментальные установки и испытательные стенды, обеспечивающие моделирование различных режимов и условий работы трибосопряжения, включая вращение колец подшипников в заданных направлениях с заданными частотами, циркуляционное и местное нагруженные опор заданной нагрузкой и частотой циркуляции нагрузки, моделирование локальных дефектов и заданных регулярных макроотклонений дорожек качения деталей (овальность, огранка заданного порядка), использование различных систем смазывания заданным смазочным материалом в необходимом количестве и т.п. Примеры таких установок представлены на рисунке 1.

К числу основных задач, успешно решаемых данными методами, относится комплексный контроль состояния подшипников и опор качения с учетом качества их комплектующих, условий сборки, качества смазочного материала, реальных режимов и

условий эксплуатации [7-12].



*Установка моделирования местного и циркуляционного нагружения трибообъекта с заданной частотой*



*Установка моделирования сложного вращения колец подшипника с заданными частотами вращения и характером нагружения*



*Установка моделирования заданных регулярных макроотклонений (овальность, огранка) дорожек качения*

**Рисунок 1 – Примеры экспериментальных установок**

На сегодняшний день предложены, апробированы и нашли практическое применение оригинальные методы и реализующие их средства, обеспечивающие решение задач: входного контроля новых подшипников при сборке ответственных изделий для предотвращения установки в изделия подшипников, обладающих потенциально низкой надежностью в конкретном изделии при реальных режимах и условиях эксплуатации; контроля качества сборки подшипниковых узлов; комплексной оценки состояния опоры качения в процессе эксплуатации ответственных изделий в целях предотвращения аварийных отказов с риском для жизни и здоровья людей, с большими экономическими потерями; оценки эффективности системы смазывания, особенно для систем с минимальным смазыванием (масляный туман, капельное смазывание и т.п.); контроля степени износа подшипника (дефектации) при проведении ремонтных работ машин и механизмов. Наряду с комплексной оценкой состояния подшипников обеспечивается возможность поиска локальных дефектов поверхностей (риски, лунки, трещины и т.п.) с указанием поврежденной детали и местоположения дефекта на дорожке качения кольца, оценки отклонений регулярной макрогеометрии рабочих поверхностей деталей собранного узла (овальность, огранка).

Другим направлением исследований в рамках трибомониторинга и трибодиагностики является термометрия в зонах трения. Решены задачи контроля температуры в зонах трения электропроводящих тел [13], в зонах сухого трения без учета и с учетом с учетом термоэлектрической неоднородности материалов трибосопряжения [14, 15], температуры смазочной пленки подшипников качения в режиме жидкостного трения [16].

Важной диагностической задачей является оценка степени износа и эффективности восстановления поверхностей деталей трибосопряжений, включая режущий инструмент. В рамках данного направления решены задачи контроля скорости изнашивания металлических трибосопряжений [17], накопленных повреждений в металле при многоциклового усталости [18], состояния и оценки стойкоститвердосплавного режущего инструмента [19], текущего состояния режущего инструмента [20], эффективности процессов ремонтного восстановления узлов трения на примере подшипников [21].

Смазочный материал является важным элементом трибосопряжения, поскольку от его состояния во многом зависит надежность, безопасность и эксплуатационные характеристики узла трения и изделия в целом. На основании проведенных исследований решены вопросы контроля электрических параметров жидких смазочных материалов [22] и вязкостно-температурных свойств моторных масел в процессе эксплуатации трибообъектов [23].

Специфика контролируемого объекта оказывает существенное влияние на эффективность и достоверность контроля, поэтому применительно к конкретным трибообъектам необходимы специфические методы оценки их состояния. Так, ряд работ был

направлен на функциональный контроль узлов автотранспорта. Предложены, в частности, электрические методы и реализующие их средства контроля ступичных подшипников [24] и генераторов [25] автомобилей. Другим специфическим трибообъектом, для которого решена задача оценки фактического состояния электрическими методами, являлся эндопротез тазобедренного сустава с парой трения «металл- металл» [26].

Электрические методы трибомониторинга и трибодиагностики обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с другими методами, однако, при решении ряда диагностических задач существенный положительный эффект достигается путем совместного использования этих методов с методами, основанными на других физических принципах, в частности, с кинематическими, вибрационными и тепловыми методами. Для реализации таких подходов разработаны соответствующие технические средства, примеры которых представлены на рисунке 2.



*Универсальный прибор  
трибодиагностики машин и  
механизмов  
электрорезистивным методом  
ИПЭК-1*



*Комплекс диагностический  
трибологический КДТ-1*



*Система, автоматизированная  
сбора и анализа данных при  
трибомониторинге САДТ-1*

**Рисунок 2 – Примеры универсальных средств трибомониторинга и трибодиагностики**

Наряду с разработкой электрических методов и средств трибомониторинга и трибодиагностики кафедра решала и решает широкий круг вопросов по контролю и диагностике фактического состояния различных объектов в процессе их производства, монтажа и эксплуатации, а также контроля различных электрических и физико-механических свойств материалов и изделий.

В рамках контроля объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта решаются вопросы оценки состояния железнодорожного полотна. В частности, разработан комплекс гидроакустических средств контроля негоризонтальности железнодорожного пути [27], оригинальный маятниковый датчик контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации [28], ведутся работы по контролю вертикальных неровностей пути [29].

Решены вопросы инструментального обеспечения контроля и регулирования температуры для помещений с однотрубной системой отопления, обладающего улучшенными метрологическими характеристиками [30], контроля высокоскоростных электропроводящих объектов на примере лопаток турбомашин [31], предложены методы и средства прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала [32], контроля неравномерности температурного поля в печах и термокамерах [33], механических свойств веществ, содержащих студнеобразователи в пищевой промышленности [34], термоэлектрического контроля металлов и сплавов [35], контроля термоэлектрической способности биметаллов хлопающих мембран датчиков температуры [36], контроля толщины слоев двухслойных проводящих материалов [37], контроля герметичности изделий с парожидкостным заполнением углеводородами [38], контроля объемного расхода газа в процессах с малым газовыделением [39].

Отдельно хотелось бы выделить исследования кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, направленные на разработку методов и средств метрологического обеспечения медицинской техники и диагностики состояния различных биологических объектов, включая человека. В рамках данного направления решены проблемы

метрологического обеспечения электрокардиоаппаратуры и контроля качества электрокардиографических сигналов [40], метрологического контроля состояния приборов доплеровской флоуметрии [41], диагностирования эндопротезов тазобедренного сустава [26], контроля ударного объема сердца человека при проведении электрофизиотерапевтических процедур [42] и поглощаемой в эпидермисе мощности излучения при низкоинтенсивной лазерной терапии [43], контроля малых концентраций этилена, выделяемого из плодов в процессе их хранения [44]. В настоящее время завершена работа по созданию оптического метода и средств функциональной диагностики влагообеспеченности растений [45, 46].

На базе кафедры создан научно-образовательный центр «Инновационные технические решения в области медицины», в рамках которого в настоящее время проводятся с широким привлечением студентов научные исследования и инженерные разработки по созданию персонализированных электрофизиологических устройств в областях медицины, связанных с кровеносной и нервной системами [47, 48].

Одним из наиболее эффективно развивающихся в последнее время направлений исследований кафедры является разработка мультимодальной оптической диагностики микроциркуляторно-тканевых систем организма человека. Данные исследования проводятся под руководством д.т.н., профессора кафедры А.В. Дунаева.

Интенсивное развитие исследований в данной области обусловило создание в университете отдельной структуры – Научно-технологического центра биомедицинской фотоники (НТЦ Биомедицинская фотоника), ведущие ученые которого принимают активное участие в педагогической деятельности на кафедре. Приоритетными направлениями центра в области научно-технической и инновационной деятельности являются:

- разработка устройств и методов для неинвазивного спектрофотометрического контроля биообъекта для различных областей медицины, включая методы динамического рассеяния света, флуоресцентной спектроскопии и визуализации, гиперспектральной визуализации, видекапилляроскопии и др.;
- разработка технологии многопараметрической оптической биопсии при малоинвазивных хирургических операциях;
- изучение колебательных процессов в микрососудистом русле человека в норме и при патологии;
- разработка методов поляризационной визуализации малигнизации биологических тканей;
- разработка носимых многоканальных лазерных доплеровских сенсоров микроциркуляции крови для диагностики нарушений сердечно-сосудистой системы;
- разработка научных основ оценки митохондриальной функции и др.

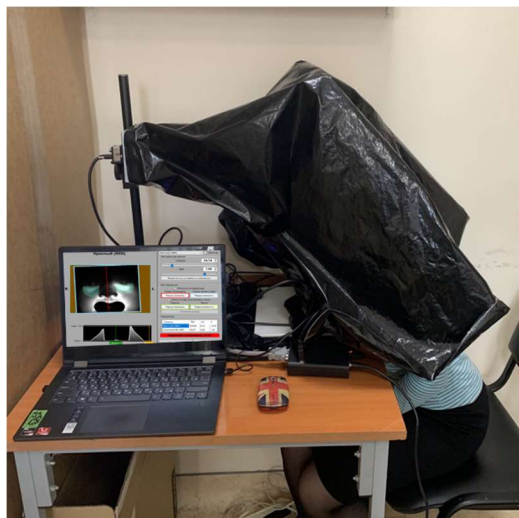
В центре проводится комплекс фундаментальных и прикладных исследований в указанных направлениях с широким привлечением студентов и аспирантов. Выполняются проекты по грантам правительства Российской Федерации (мегагрантам), грантам РФФИ по программам «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами», «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых», «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» и др.

К основным научным результатам, достигнутым учеными центра и представленным в защищенных диссертационных работах, можно отнести следующее: разработана общая методология, комплекс методов и средств мультимодальной оптической диагностики микроциркуляторно-тканевых систем организма человека [49, 50], разработаны методы и устройства диагностики функционального состояния периферических сосудов верхних конечностей [51], диагностики нарушений тканевого метаболизма на основе оптической спектроскопии на примере сахарного диабета [52], диагностики микроциркуляторных нарушений при ревматических заболеваниях на основе вейвлет-анализа колебаний периферического кровотока [53], диагностики патологических изменений системы микроциркуляции крови на основе анализа спектров доплеровского уширения лазерного излучения [54], цифровой диафаноскопии для диагностики патологий верхнечелюстных пазух [55], метод и портативное устройство лазерной доплеровской флоуметрии для диагностики расстройств периферического кровотока при различных патологических состояниях [56]. В

настоящее время завершена работа по созданию методологии, комплекса методов и средств интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров биотканей в малоинвазивной хирургии [57, 58]. На рисунке 3 представлены примеры разработок центра.



*Программно-аппаратный комплекс для оценки кровоснабжения биологических тканей методом лазерной спекл-контрастной визуализации*



*Программно-аппаратный комплекс для цифровой диафаноскопии*



*Программно-аппаратный комплекс для оценки жизнеспособности тканей методом гиперспектральной визуализации*

**Рисунок 3 - Примеры разработок НТЦ Биомедицинская фотоника**

В заключении хочется отметить, что кафедра приборостроения, метрологии и сертификации не смотря на свой преклонный возраст продолжает активно развиваться. Сменяются поколения ученых, тематика научных исследований трансформируется в соответствие с бурным развитием науки и технологии, появляются новые задачи, новые подходы к их решению, новый инструментарий в проведении исследований, расширяются возможности информационных технологий и искусственного интеллекта. При этом однако, остается честное отношение к науке, талантливая молодежь и мудрые наставники, что всегда характеризовало научно-педагогический коллектив кафедры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.: Под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Non-destructive Testing and Diagnostics: Handbook/ Editors prof.V.V. Klyuev and dr. G. Zusman/ – Moscow – Houston: RSNTTD and Metrics Instrument Co., 2004. – 656 p.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. /Под общей ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1. В.П. Вавилов. Тепловой контроль. Кн. 2.К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужикский. Электрический контроль. –2-изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.
4. Non-destructive testing: Handbook: in 8 volumes /Edited by V.V. Klyuev. V. 5: in 2 books. Book 1: V.P. Vavilov. Thermal/ Infrared testing. Book 2: K.V. Podmasteryev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Nogachyova, E.V. Pakholkin, L.A.Bondareva. Electrical testing. – М.: Publishing house Spektr, 2009. – 732 p.
5. Подмастерьев К.В. Теория, методы и средства комплексного электрорезистивного диагностирования подшипников качения: дисс. на соискание уч. степ. доктора. техн. наук, 2002.
6. Подмастерьев К.В. Электрический метод и средства диагностирования подшипников качения (при изготовлении и ремонте машин и механизмов): дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1986.
7. Варгашкин Электрический метод и средство диагностирования подшипниковых опор качения с жидкостной смазкой: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1993.
8. Мишин В.В. Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: 1999.
9. Пахолкин Е.В. Метод и средства поиска локальных дефектов при контроле опор качения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1999.
10. Марков В.В. Электрорезистивный метод и средства диагностирования подшипников качения: дисс.

на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2004.

11. Чернышев В.Н. Электрорезистивный метод контроля режима трения при диагностировании подшипников качения на основе алгоритмического обучения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2013

12. Андросова Е.Б. Метод контроля шариковых подшипников с учётом виброударного режима: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2014.

13. Плахова Е.В. Разработка метода и средств контроля температуры в зоне трения электропроводящих тел: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1997.

14. Сковпень В.Н. Разработка метода и средств контроля температуры в зоне сухого трения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1999.

15. Потапова Е.В. Термоэлектрический метод контроля температур в зоне сухого трения с учетом термоэлектрической неоднородности материалов трибосопряжения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2008.

16. Горбунов Р.А. Метод и средство контроля температуры смазочной пленки подшипников качения в режиме жидкостного трения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2002.

17. Козлов А.В. Метод и средство контроля скорости изнашивания металлических трибосопряжений: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2002.

18. Тупикин Д.А. Термоэлектрический метод контроля накопленных повреждений в металле при многоциклового усталости, на примере алюминиевого сплава: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2003.

19. Мельник Е.Е. Метод и средство контроля состояния и оценки стойкости твердосплавного режущего инструмента: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2003.

20. Бакурова Ю.А. Термоэлектрический метод неразрушающего контроля режущего инструмента: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2010.

21. Анцифорова Е.В. Электрический метод трибомониторинга процессов ремонтного восстановления узлов трения: на примере подшипников: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2014.

22. Давыдова Н.В. Резистивный метод и устройство контроля электрических параметров жидких смазочных материалов: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2012.

23. Фокин Н.Н. Электрорезистивный метод и средство контроля вязкостно-температурных свойств моторных масел: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2010.

24. Майоров М.В. Разработка комплексного метода диагностирования ступичных подшипников автомобиля: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2015.

25. Селихов А.В. Повышение эффективности диагностирования технического состояния генератора автомобиля электрорезистивным методом: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2017.

26. Жидков А.В. Электрорезистивный метод и средство диагностирования трибоузла сферической формой деталей (на примере эндопротеза тазобедренного сустава с парой трения «металл-металл»): дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2019.

27. Есипов А.В. Гидроакустические средства контроля негоризонтальности железнодорожного пути: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2004.

28. Незнанов А.И. Маятниковый датчик контроля уровня железнодорожного пути с ультразвуковым съемом информации: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2018.

29. Незнанов, А.И. Бесхордовые методы измерения вертикальных неровностей железнодорожного пути // А.И. Незнанов, К.В. Подмастерьев, О.А. Сулов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 3 (353). С. 179-185.

30. Петрова О.С. Средство контроля и регулирования температуры с улучшенными метрологическими характеристиками для помещений с однотрубной системой отопления: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2009.

31. Милушин Н.Н. Фазогенераторный датчик контроля высокоскоростных электропроводящих объектов: на примере турбомашин: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2013.

32. Моисеев С.А. Метод прогнозирующего контроля радиоэлектронной аппаратуры с адаптацией межконтрольного интервала: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2013.

33. Маркова Н.Н. Термоэлектрический метод контроля неравномерности температурного поля в печах и термокамерах: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2005.

34. Шведов П.А. Разработка методов и средств контроля механических свойств веществ, содержащих студнеобразователи: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1999.

35. Нестерович Ю.А. Разработка метода и средств термоэлектрического контроля металлов и сплавов: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2000.

36. Калюк А.В. Контроль термоэлектрической способности биметаллов хлопающих мембран датчиков температуры: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2006.

37. Углова Н.В. Термоэлектрический метод и устройство контроля толщины слоев двухслойных проводящих материалов: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2005.

38. Грядунова Е.Н. Фотометрический метод и средство контроля герметичности изделий с парожидкостным заполнением углеводородами: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 1998.

39. Лунин М.В. Метод и средство контроля объемного расхода газа в процессах с малым газовыделением: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2010.

40. Козюра А.А. Методы и средства контроля электрокардиоаппаратуры и качества электрокардиографических сигналов: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2013.

41. Жеребцов Е.А. Метод и устройство метрологического контроля состояния приборов лазерной доплеровской флоуметрии: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2013.

42. Яковенко М.В. Метод и средства контроля ударного объема, совместимые с токовым воздействием: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2010.

43. Дунаев А.В. Метод контроля поглощаемой в эпидермисе мощности излучения при низкоинтенсивной лазерной терапии: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2002.
44. Бондарева Л.А. Метод контроля малых концентраций этилена и способ его реализации: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2000.
45. Бондарева Л.А., Суханова М.В. Способ оценки функционального состояния растений для определения их потребностей в воде // Патент РФ №2719788 A01G 7/04, G01N 21/17. – Оpubл. 23.04.2020 г., Бюл. № 12.
46. Суханова, М.В. Измерительное устройство для определения уровня влагообеспеченности листовых растений // М.В. Суханова, Л.А. Бондарева // Автоматизация в промышленности. – № 2. – 2021. – С. 15-19.
47. Денисов, Д.В. и др. Исследование корреляции изменения импеданса и скорости кровотока в левой сонной артерии / Д.В. Денисов, А.В. Жидков, В.П. Немов, К.В. Подмастерьев, А.В. Семичев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2024. - № 1(363). - С.122-129.
48. Жидков, А.В. Исследование импеданса тканей при различной частоте переменного тока / А. В. Жидков, К. В. Подмастерьев, Д. В. Денисов, Х. А. Абдувосидов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 6 (368). – С. 118-126
49. Дунаев А.В. Методы и средства мультимодальной оптической диагностики микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: дисс. на соискание уч. степ. докт. техн. нау, 2021.
50. Дунаев А. В. Мультимодальная оптическая диагностика микроциркуляторно-тканевых систем организма человека: монография / А. В. Дунаев. — Старый Оскол: ТНТ, 2022. — 440 с.: ил.
51. Жеребцова А.И. Метод и устройство диагностики функционального состояния периферических сосудов верхних конечностей: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2016.
52. Дрёмин В.В. Метод и устройство диагностики нарушений тканевого метаболизма на основе оптической спектроскопии (на примере сахарного диабета): дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2017.
53. Маковик И.Н. Метод и устройство диагностики микроциркуляторных нарушений при ревматических заболеваниях на основе вейвлет-анализа колебаний периферического кровотока: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2018.
54. Козлов И.О. Метод и устройство для диагностики патологических изменений системы микроциркуляции крови на основе анализа спектров доплеровского уширения лазерного излучения: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2022.
55. Брянская Е.О. Метод и устройство цифровой диафаноскопии для диагностики патологий верхнечелюстных пазух: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2023.
56. Жарких Е.В. Метод и портативное устройство лазерной доплеровской флоуметрии для диагностики расстройств периферического кровотока при различных патологических состояниях: дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук, 2023.
57. Потапова, Е.В. Метод синтеза биотехнической системы интраоперационной оптической диагностики перфузионно-метаболических параметров в малоинвазивной хирургии / Е.В. Потапова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 5 (367). С. 60-70.
58. Потапова, Е.В. Разработка биотехнической системы интраоперационной диагностики перфузионно-метаболических параметров биотканей при малоинвазивных хирургических вмешательствах / Е.В. Потапова // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – № 5, С. 5-16.

**Подмастерьев Константин Валентинович**

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

Доктор технических наук, профессор, директор института приборостроения, автоматизации и информационных технологий  
302020, г. Орёл, Науторское шоссе, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

PODMASTERIEV K.V.

## SIXTY YEARS OF FRUITFUL SCIENTIFIC ACTIVITY IN THE FIELD OF CONTROL, DIAGNOSTICS, GENERAL AND MEDICAL INSTRUMENT ENGINEERING

**Abstract.** *A brief analysis of the scientific areas of activity of the Department of Instrumentation Metrology and Certification of Oryol State University named after I.S. Turgenev, who turned 60 years old from the date of formation. The main achievements and development prospects are noted.*

**Keywords:** *non-destructive testing, diagnostics, electrical methods, friction units, tribmonitoring, biomedical photonics, multimodal optical diagnostics.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Nerazrushayushchij kontrol i diagnostika: Spravochnik /V.V. Klyuev, F.R. Sosnin, A.V. Kovalev i dr.: Pod red. V.V. Klyueva. 3-e izd., ispr i dop. – М.: Mashinostroenie, 2005. – 656 s.
2. Non-destructive Testing and Diagnostics: Handbook/ Editors prof.V.V. Klyuev and dr. G. Zusman/ – Moscov

– Houston: RSNTTD and Metrics Instrument Co., 2004. – 656 p.

3. Nerazrushayushchij kontrol: Spravochnik: v 8 t. /Pod obshej red. V.V. Klyueva. T. 5: V 2 kn. Kn. 1. V.P. Vavilov. Teplovoj kontrol. Kn. 2.K.V. Podmasterev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Nogacheva, E.V. Paholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhickij. Elektricheskij kontrol. –2-izd., ispr. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 688 s.

4. Non-destructive testing: Handbook: in 8 volumes /Edited by V.V. Klyuev. V. 5: in 2 books. Book 1: V.P. Vavilov. Thermal/ Infrared testing. Book 2: K.V. Podmasteryev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Nogachyova, E.V. Pakholkin, L.A. Bondareva. Electrical testing. – M.: Publishing house Spektr, 2009. – 732 p.

5. Podmasterev K.V. Teoriya, metody i sredstva kompleksnogo elektrozestivnogo diagnostirovaniya podshipnikov kacheniya: diss. na soiskanie uch. step. doktora. tekhn. nauk, 2002.

6. Podmasterev K.V. Elektricheskij metod i sredstva diagnostirovaniya podshipnikov kacheniya (pri izgotovlenii i remonte mashin i mekhanizmov): diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1986.

7. Vargashkin Elektricheskij metod i sredstvo diagnostirovaniya podshipnikov opor kacheniya s zhidkostnoj smazkoj: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1993.

8. Mishin V.V. Metod i sredstva diagnostirovaniya podshipnikov uzlov s uchetom makrogeometrii dorozhek kacheniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk: 1999.

9. Paholkin E.V. Metod i sredstva poiska lokalnyh defektov pri kontrole opor kacheniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1999.

10. Markov V.V. Elektrozestivnyj metod i sredstva diagnostirovaniya podshipnikov kacheniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2004.

11. Chernyshev V.N. Elektrozestivnyj metod kontrolya rezhima treniya pri diagnostirovanii podshipnikov kacheniya na osnove algoritmicheskogo obucheniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2013

12. Androsova E.B. Metod kontrolya sharikov podshipnikov s uchotom vibroudarnogo rezhima: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2014.

13. Plahova E.V. Razrabotka metoda i sredstv kontrolya temperatury v zone treniya elektroprovodyashchih tel: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1997.

14. Skovpen V.N. Razrabotka metoda i sredstv kontrolya temperatury v zone suhogo treniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1999.

15. Potapova E.V. Termoelektricheskij metod kontrolya temperatur v zone suhogo treniya s uchetom termoelektricheskoy neodnorodnosti materialov tribosopryazheniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2008.

16. Gorbunov R.A. Metod i sredstvo kontrolya temperatury smazochnoj plenki podshipnikov kacheniya v rezhime zhidkostnogo treniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2002.

17. Kozlov A.V. Metod i sredstvo kontrolya skorosti iznashivaniya metallicheskih tribosopryazhenij: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2002.

18. Tupikin D.A. Termoelektricheskij metod kontrolya nakoplenykh povrezhdenij v metalle pri mnogociklovoj ustalosti, na primere alyuminievogo splava: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2003.

19. Melnik E.E. Metod i sredstvo kontrolya sostoyaniya i ocenki stojkosti tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2003.

20. Bakurova YU.A. Termoelektricheskij metod nerazrushayushchego kontrolya rezhushchego instrumenta: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2010.

21. Anciforova E.V. Elektricheskij metod tribomonitoringa processov remontnogo vosstanovleniya uzlov treniya: na primere podshipnikov: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2014.

22. Davydova N.V. Rezistivnyj metod i ustrojstvo kontrolya elektricheskikh parametrov zhidkih smazochnykh materialov: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2012.

23. Fokin N.N. Elektrozestivnyj metod i sredstvo kontrolya vyzkostno-temperaturnykh svojstv motornykh masel: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2010.

24. Majorov M.V. Razrabotka kompleksnogo metoda diagnostirovaniya stupichnykh podshipnikov avtomobilya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2015.

25. Selihov A.V. Povyshenie effektivnosti diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya generatora avtomobilya elektrozestivnym metodom: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2017.

26. ZHidkov A.V. Elektrozestivnyj metod i sredstvo diagnostirovaniya tribouzla so sfericheskoy formoj detalej (na primere endoproteza tazobedrennogo sustava s paroj treniya «metall-metall»): diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2019.

27. Esipov A.V. Gidroakusticheskie sredstva kontrolya negorizontalnosti zheleznodorozhnogo puti: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2004.

28. Neznanov A.I. Mayatnikovyy datchik kontrolya urovnya zheleznodorozhnogo puti s ultrazvukovym s"emom informacii: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2018.

29. Neznanov, A.I. Beskhordovye metody izmereniya vertikalnykh nerovnostej zheleznodorozhnogo puti /A.I. Neznanov, K.V. Podmasterev, O.A. Suslov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2022. № 3 (353). S. 179-185.

30. Petrova O.S. Sredstvo kontrolya i regulirovaniya temperatury s uluchshennymi metrologicheskimi harakteristikami dlya pomeshchenij s odnotrubnoj sistemoy otopleniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2009.

31. Milyushin N.N. Fazogeneratornyj datchik kontrolya vysokoskorostnykh elektroprovodyashchih ob"ektov: na primere turbomashin: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2013.

32. Moiseev S.A. Metod prognoziruyushchego kontrolya radioelektronnoj apparatury s adaptaciej mezhkontrolnogo intervala: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2013.

33. Markova N.N. Termoelektricheskij metod kontrolya neravnomernosti temperaturnogo polya v pechah i termokamerah: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2005.

34. SHvedov P.A. Razrabotka metodov i sredstv kontrolya mekhanicheskikh svojstv veshchestv, soderzhashchih

studneobrazovateli: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1999.

35. Nesterovich YU.A. Razrabotka metoda i sredstva termoelektricheskogo kontrolya metallov i splavov: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2000.

36. Kalyuk A.V. Kontrol termoelektricheskoy sposobnosti bimetallov hlopayushchih membran datchikov temperatury: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2006.

37. Uglova N.V. Termoelektricheskij metod i ustrojstvo kontrolya tolshchiny sloev dvuhslojnyh provodyashchih materialov: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2005.

38. Gryadunova E.N. Fotometricheskij metod i sredstvo kontrolya germetichnosti izdelij s parozhidkostnym zapolneniem uglevodorodami: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 1998.

39. Lunin M.V. Metod i sredstvo kontrolya ob"emnogo rashoda gaza v processah s malym gazovydeleniem: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2010.

40. Kozyura A.A. Metody i sredstva kontrolya elektrokardioapparatury i kachestva elektrokardiograficheskikh signalov: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2013.

41. ZHerebcov E.A. Metod i ustrojstvo metrologicheskogo kontrolya sostoyaniya priborov lazernoj doplerovskoj floumetrii: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2013.

42. YAkovenko M.V. Metod i sredstva kontrolya udarnogo ob"ema, sovmestimye s tokovym vozdejstviem: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2010.

43. Dunaev A.V. Metod kontrolya pogloshchaemoj v epidermise moshchnosti izlucheniya pri nizkointensivnoj lazernoj terapii: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2002.

44. Bondareva L.A. Metod kontrolya malyh koncentracij etilena i sposob ego realizacii: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2000.

45. Bondareva L.A., Suhanova M.V. Sposob ocenki funkcionalnogo sostoyaniya rastenij dlya opredeleniya ih potrebnoej v vode // Patent RF №2719788 A01G 7/04, G01N 21/17. – Opubl. 23.04.2020 g., Byul. № 12.

46. Suhanova, L.A. Bondareva // Avtomatizaciya v promyshlennosti. – № 2. – 2021. – S. 15-19.

47. Denisov, D.V. i dr. Issledovanie korrelyacii izmeneniya impedansa i skorosti krovotoka v levoj sonnoj arterii / D.V. Denisov, A.V. ZHidkov, V.P. Nemov, K.V. Podmasterev, A.V. Semichev // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 1(363). – С.122-129.

48. ZHidkov, A.V. Issledovanie impedansa tkanej pri razlichnoj chastote peremennogo toka / A. V. ZHidkov, K. V. Podmasterev, D. V. Denisov, H. A. Abduvosidov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 6 (368). – S. 118-126

49. Dunaev A.V. Metody i sredstva multimodalnoj opticheskoy diagnostiki mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka: diss. na soiskanie uch. step. dokt. tekhn. nau, 2021.

50. Dunaev A. V. Multimodalnaya opticheskaya diagnostika mikrocirkulyatorno-tkanevyh sistem organizma cheloveka: monografiya / A. V. Dunaev. — Staryj Oskol: TNT, 2022. — 440 s.: il.

51. ZHerebcova A.I. Metod i ustrojstvo diagnostiki funkcionalnogo sostoyaniya perifericheskikh sosudov verhnih konechnostej: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2016.

52. Dryomin V.V. Metod i ustrojstvo diagnostiki narushenij tkanevogo metabolizma na osnove opticheskoy spektroskopii (na primere saharnogo diabeta): diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2017.

53. Makovik I.N. Metod i ustrojstvo diagnostiki mikrocirkulyatornyh narushenij pri revmatischeskikh zabolevaniyah na osnove vejvlet-analiza kolebanij perifericheskogo krovotoka: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2018.

54. Kozlov I.O. Metod i ustrojstvo dlya diagnostiki patologicheskikh izmenenij sistemy mikrocirkulyacii krovi na osnove analiza spektrov dopplerovskogo ushireniya lazernogo izlucheniya: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2022.

55. Bryanskaya E.O. Metod i ustrojstvo cifrovoj diafanoskopii dlya diagnostiki patologij verhnechelyustnyh pazuh: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2023.

56. ZHarkih E.V. Metod i portativnoe ustrojstvo lazernoj dopplerovskoj floumetrii dlya diagnostiki rasstrojstv perifericheskogo krovotoka pri razlichnyh patologicheskikh sostoyaniyah: diss. na soiskanie uch. step. kand. tekhn. nauk, 2023.

57. Potapova, E.V. Metod sinteza biotekhnicheskoy sistemy intraoperacionnoj opticheskoy diagnostiki perfuzionno-metabolicheskikh parametrov v maloinvazivnoj hirurgii / E.V. Potapova // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 5 (367). S. 60-70.

58. Potapova, E.V. Razrabotka biotekhnicheskoy sistemy intraoperacionnoj diagnostiki perfuzionno-metabolicheskikh parametrov biotkaney pri maloinvazivnyh hirurgicheskikh vmeshatelstvah / E.V. Potapova // Biomedicinskaya radioelektronika. – 2024. – № 5, S. 5-16

# **Podmasteryev Konstantin Valentinovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Orel State University named after I.S. Turgenev»,

Doctor of Technical Sciences, professor, Director of the Institute of Instrument Engineering,

Automation and Information Technologies

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

E-mail: asms-orel@mail.ru

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

УДК 621.7, 621.431

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-369-1-16-22

НЕМЕНКО А.В., НИКИТИН М.М.

## **ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА**

**Аннотация.** Поверхности второго порядка имеют широкое распространение. Финишная обработка изделия с такими поверхностями сопровождается циклическими знакопеременными напряжениями. Изменения механических свойств материала изделия, из которого оно изготовлено, улучшая геометрические характеристики поверхности, снижают остаточный ресурс до появления усталостного отказа. В настоящей работе проанализированы показатели качества изделий, содержащих поверхности второго порядка, на предмет геометрического соответствия, наличия концентрированных дефектов, потери остаточного ресурса при обработке, и выработана дискретно-непрерывная мера, позволяющая оценить эти явления с количественной стороны.

**Ключевые слова:** детали машин, поверхность второго порядка, финишная обработка, технологическая усталость, циклическое нагружение.

### **Введение**

Изделия, содержащие поверхности второго порядка, к настоящему времени оцениваются и контролируются по различным методикам, на часть из которых отсутствуют единые стандарты [1]. Меры возникающих отклонений от некоторого номинала могут быть составлены различным образом от прямого подсчета дискретных дефектов до неочевидных преобразований пространств, включающих формальные координаты разной физической природы [2]. В сложных ситуациях может применяться факторное ранжирование и метод экспертных оценок, вводящий в меру усредненный элемент субъективности [3].

Вместе с тем, не только не вошедшим в ГОСТ, но и вообще не учитываемым с точки зрения качества, остается элемент потери ресурса циклически нагружаемого изделия в ходе предварительной обработки.

В работах [4] ... [7] было рассмотрено понятие технологической усталости, описывающее данное явление с качественной и количественной стороны. В настоящей работе рассмотрим качество изготавливаемого изделия с учетом как геометрического соответствия, так и потери несущей способности в ходе циклического нагружения при обработке.

### **Цель работы.**

Получить меру соответствия (качества) изделий, содержащих поверхности второго порядка и подвергающихся эксплуатационным нагрузкам. Мера должна учитывать степень потери ресурса нагружаемого изделия при финишной обработке.

### **Материал исследования**

В качестве основных факторов, влияющих на качество, рассмотрим

- прямое геометрическое соответствие заданным размерам в каждой точке;
- соответствие чистоты поверхности по концентрированным дефектам
- соответствие механических свойств (отсутствие трещин и внутренних напряжений)

материала изделия;

- соответствие ресурса изделия требуемым показателям.

Используем факторный подход [1] и представим меру качества в дискретно-непрерывном виде

$$M = \alpha \cdot \varepsilon_{\phi} + \beta \cdot M_m + \gamma \cdot S_{\partial} + \delta \cdot \varepsilon_p, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\phi}$  - относительное отклонение размеров;

$M_m$  – мера отклонения внутренних механических свойств;

$S_\partial$  – количество единичных дефектов размера концентраторов напряжений;

$\varepsilon_p$  – относительная потеря ресурса, безразмерная величина;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – весовые коэффициенты.

### **Оценки соответствия геометрии**

Будем рассматривать изделие с малым отклонением локальных участков от плоскостей, внутри которых выделим прямоугольную систему координат  $\{OX, OY\}$ . Разделим каждый участок на площадки с центрами  $(x_k, y_k)$  и составим следующую сумму по всем площадкам разбиения

$$S_m = \sum_{k=0}^n \left( \frac{h_p(x_k, y_k) - h_\phi(x_k, y_k)}{h_p(x_k, y_k)} \right) \cdot \lambda(x_k, y_k) \Delta x_k \Delta y_k, \quad (2)$$

где  $h_p(x_k, y_k)$  – заданное расстояние точки на участке от базовой плоскости;

$h_\phi(x, y)$  – фактическое расстояние точки на участке относительно базовой плоскости;

$\lambda(x, y)$  – локальная весовая функция, учитывающая важность соблюдения формы именно в этой точке.

Выполнив предельный переход и обработав все локальные участки, получим меру относительного отклонения геометрических показателей в следующей форме

$$\varepsilon_m = \sum_{k=0}^m \iint_{D_m} \left( \frac{h_p(x, y) - h_\phi(x, y)}{h_p(x, y)} \right) \cdot \lambda(x, y) \cdot dx dy, \quad (3)$$

где  $D_m$  – геометрические области, соответствующие участкам контролируемой детали.

### **Оценки соответствия сплошности материала и равномерности его характеристик по объёму изделия**

В работах [4] ... [7] было показано, что касательные напряжения, возникающие в сечении детали при её нагружении, могут быть интерпретированы как функция комплексного переменного, действительная и мнимая части которого пропорциональны произвольным координатам в сечении, образующим прямоугольную систему.

Данная функция будет аналитической для всех точек материала за исключением резких локальных неоднородностей и разрывов сплошности, к которым, в частности, относятся внутренние трещины.

Практическим следствием этих свойств, позволяющим оценить внутреннее состояние материала, в том числе и непрозрачного, является независимость интеграла по касательным напряжениям от пути, по которому он берется. В частности, если путь образует замкнутый контур  $D$ , то мы получаем интеграл Коши

$$\oint_D \tau(z) dz = \text{const}. \quad (4)$$

Величина правой части формулы (4) качественно отличается для однородного и неоднородного материала; в первом случае правая часть всегда обращается в нуль, во втором мы получаем некоторое положительное или отрицательное значение.

Практически, интеграл может быть вычислен при совмещении контура интегрирования с внешним контуром сечения путем размещения на этом контуре датчиков касательных напряжений.

Для этого применим известное соотношение для интегрирования функций комплексного переменного

$$\oint_D \tau(z) dz = \oint_D (u(x, y) dx - v(x, y) dy) + i \oint_D (v(x, y) dx + u(x, y) dy), \quad (5)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты точек при обходе контура выделенного сечения;  $u(x,y)$  и  $v(x,y)$  – действительная и мнимая части комплекснозначной функции касательных напряжений.

Используя интерпретацию координат в прямоугольной системе как действительной и мнимой осей комплексной переменной, а также зная, что на внешнем контуре касательное напряжение будет направлено по касательной к нему, преобразуем (5) к следующей приближенной зависимости

$$\oint_D \tau(z) dz \approx - \sum_{k=1}^S \tau(x_k, y_k) \cdot \{ (x_{k+1} - x_k) \cdot \sin \alpha(x_k, y_k) + (y_{k+1} - y_k) \cdot \cos \alpha(x_k, y_k) \} + \\ + i \cdot \sum_{k=1}^S \tau(x_k, y_k) \cdot \{ (x_{k+1} - x_k) \cdot \cos \alpha(x_k, y_k) - (y_{k+1} - y_k) \cdot \sin \alpha(x_k, y_k) \}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – угол, который составляет ось действительной переменной с нормалью к границе выделенного сечения.

Точность формулы (6) повышается при приближении контура интегрирования к окружности, а также с увеличением количества датчиков и равномерности заполнения ими контура интегрирования.

Тогда меру отклонений механических свойств материала (трещины + неравномерное поле напряжений) окончательно можно представить в виде

$$M_{\text{м}} = \sqrt{J_1^2 + J_2^2}, \quad (7)$$

где

$$J_1 \approx - \sum_{k=1}^S \tau(x_k, y_k) \cdot \{ (x_{k+1} - x_k) \cdot \sin \alpha(x_k, y_k) + (y_{k+1} - y_k) \cdot \cos \alpha(x_k, y_k) \}, \quad (8)$$

$$J_2 \approx \sum_{k=1}^S \tau(x_k, y_k) \cdot \{ (x_{k+1} - x_k) \cdot \cos \alpha(x_k, y_k) - (y_{k+1} - y_k) \cdot \sin \alpha(x_k, y_k) \}. \quad (9)$$

В случае прозрачных материалов интегрирование по контуру (4) существенно упрощается за счет использования эффекта вращения плоскости поляризации [3] и может быть выполнено в аналоговом виде.

### Оценки соответствия остаточного ресурса

Считаем, что в процессе обработки происходит циклическое знакопеременное нагружение изготавливаемого изделия некоторым технологическим усилием. Возникающие при этом обобщенные уровни нормальных и касательных напряжений обозначим как  $\{\sigma_{\text{т}}, \tau_{\text{т}}\}$

Поставим задачу учесть потерю ресурса, вызываемую этим нагружением, если по требованию к изготовленному изделию оно должно проработать заданное количество циклов при условии нагружения его эксплуатационными усилиями с созданием обобщенного уровня напряжений  $\{\sigma_{\text{эксп}}, \tau_{\text{эксп}}\}$

Рассмотрим уровни нагрузки, образующие кривую выносливости при испытаниях образцов, соответствующих изделию с некоторой степенью подобия

$$u_1, u_2, \dots, u_n. \quad (10)$$

Для каждого значения рассмотрим количество циклов  $N_k$  до разрушения образца как положительную случайную величину с условной функцией распределения  $F_k(x)$

$$F_k(x) = P\{N < x\} | u = u_k, \quad (11)$$

где  $x$  – заданная величина;

$P$  – вероятность того, что образец или деталь проработает количество циклов, меньшее  $x$ .

Предположим, что у количества циклов, воспроизводимого в разных испытаниях, имеются плотность вероятности  $f_k(x)$  и математическое ожидание  $M_k$

$$f_k(x) = \frac{d}{dx} \cdot F_k(x), \quad (12)$$

$$M_k = \int_0^{\infty} x \cdot f_k(x) dx. \quad (13)$$

Формулы (11 ... 13) можно представить как функцию дискретного аргумента  $k$ , соответствующего номеру в последовательности испытаний с заданными уровнями нагрузки.

Рассмотрим ту же задачу в случае непрерывного варьирования нагрузки и при изготовлении, и при эксплуатации, при этом введём непрерывный параметр  $u$ , соответствующий уровню напряжений. Примем дополнительное допущение об эргодическом свойстве процессов испытаний образцов, изготовления изделий и эксплуатации изделий, приводящем к одним и тем же вероятностным описаниям для процессов последовательного и параллельного нагружения.

Рассмотрим эти процессы как нестационарные и параметризуемые введённой величиной  $u$ .

Поставим задачу найти вероятностное описание числа циклов  $N_{\text{экс}}$ , оставшегося на эксплуатацию.

Введём функцию распределения

$$R_{N_{\text{экс}}}(x) = P\{N_{\text{экс}} < x\} \text{ при } u = u_{\text{экс}}. \quad (14)$$

Пусть изделие осталось целым по истечении  $N_{\text{обр}}$  циклов обработки (событие  $A$ ) и разрушилось после этого, испытав не более  $x$  циклов в эксплуатации (событие  $B$ ). Уровни нагружения при обработке и в эксплуатации примем разными, но постоянными на каждом режиме.

Тогда функцию распределения (14) можно выразить через условную вероятность события  $B$  в предположении, что событие  $A$  уже наступило:

$$R_{N_{\text{экс}}}(x) = P(B | A) = \frac{P(A \cdot B)}{P(B)}, \quad (15)$$

где  $P(A \cdot B)$  – вероятность совместного наступления выделенных событий  $A$  и  $B$ ,  
 $P(B)$  – вероятность события  $B$  (изделие разрушилось в процессе эксплуатации через количество циклов от 0 до величины  $x$ ).

Представим вторую из этих величин в следующем виде

$$P(B) = P\{N_{\text{обр}} > x\} = 1 - F_{\text{обр}}(x). \quad (16)$$

Выражение в числителе формулы (15) получим через следующую схему:

Условно представим циклическое нагружение при обработке и на готовом изделии двумя уровнями нагрузки как нагружение одним уровнем (эксплуатационным), но при другом (большем) количестве циклов  $N_{\text{эк}}$  при изготовлении, находимом из расчета равной потери несущей способности с фактически имеющим место.

Тогда получим следующую расчетную формулу

$$P(A \cdot B) = \int_{N_{\text{экв}}}^{N_{\text{экв}} + x} f_{\text{экс}}(a) da, \quad (17)$$

где  $a$  – переменная интегрирования, которую сократим, взяв интеграл.

Учитывая, что первообразная от плотности вероятности есть функция распределения, запишем (17) в явном виде

$$P(A \cdot B) = F_{\text{экс}}(N_{\text{экв}} + x) - F_{\text{экс}}(N_{\text{экв}}). \quad (18)$$

Применив формулы (16) и (18), преобразуем формулу (14) к виду

$$R_{N_{\text{экс}}}(x) = \frac{F_{\text{экс}}(N_{\text{экв}} + x) - F_{\text{экс}}(N_{\text{экв}})}{1 - F_{\text{обр}}(N_{\text{обр}})}. \quad (19)$$

В качестве меры несущей способности, позволяющей оценить её уменьшение с количественной стороны, возьмём математическое ожидание  $MN_{\text{экс}}$  количества циклов до отказа при эксплуатации

$$MN_{\text{эксн}} = \int_0^{\infty} x \cdot r_{N_{\text{эксн}}}(x) dx, \quad (20)$$

где  $r_{N_{\text{эксн}}}(x)$  – плотность вероятности случайной величины «количество циклов до отказа в эксплуатации».

Плотность вероятности можно получить, продифференцировав функцию распределения (19), в результате получим

$$r_{N_{\text{эксн}}}(x) = \frac{f_{\text{эксн}}(N_{\text{экв}} + x)}{1 - F_{\text{обр}}(N_{\text{обр}})}. \quad (21)$$

При подстановке (21) в (20) получим искомое математическое ожидание:

$$MN_{\text{эксн}} = \frac{1}{1 - F_{\text{обр}}(N_{\text{обр}})} \cdot \int_0^{\infty} x \cdot f_{\text{эксн}}(N_{\text{экв}} + x) dx. \quad (22)$$

Для использования формул (19) и (22) требуется определить эквивалентные числа циклов при обработке и в эксплуатации  $N_{\text{обр}}$  и  $N_{\text{экв}}$ , а также эквивалентную функцию распределения циклов до отказа при обработке  $F_{\text{обр}}$ .

Составим уравнения для численного нахождения этих величин.

Разделим интервал обработки на  $n$  последовательных интервалов, на каждом из которых выделим события  $A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_n$ , состоящие в том, что деталь перенесла обработку и не разрушилась.

Тогда вероятность события  $C$ , согласно которому деталь не разрушается на всём интервале, можно выразить через следующее произведение условных вероятностей

$$P(C) = P(A_1) \cdot P(A_2|A_1) \cdot \dots \cdot P(A_n|A_1, A_2, \dots, A_{n-1}), \quad (23)$$

В формуле (23) через запятую перечислены совместные события, соответствующие не разрушению детали на всех предшествующих интервалах.

Используя подход, полученный в работе [ 7 ], получим рекуррентные формулы, для последнего из интервалов обработки приводящие к выражению

$$P(A_n|A_1, A_2, \dots, A_{n-1}) = \frac{1 - F_{u_n}(N_{\text{экв}_{n-1}} + N_n)}{1 - F_{u_{n-1}}(N_{\text{экв}_{n-2}} + N_{n-1})}, \quad (24)$$

где

$$F_{u_n}(N_{\text{экв}_{n-1}}) = F_{u_{n-1}}(N_{\text{экв}_{n-2}} + N_{n-1}). \quad (25)$$

Из структуры формул (23 ... 25) следует, что промежуточные дроби в произведении взаимно сокращаются, и в результате формулу (23) можно преобразовать к виду

$$P(C) = 1 - F_{u_n}(N_{\text{экв}_{n-1}} + N_n). \quad (26)$$

Отметим, что, в силу свойств функции распределения, формула (26) равна знаменателю формулы (19), который теперь может быть последовательно вычислен с помощью эквивалентных чисел циклов на каждом интервале. В числителе же находится эквивалентное число циклов на последнем интервале, рассчитанное по нагрузке в эксплуатации, чтобы его найти, надо решить уравнение

$$F_{\text{эксн}}(N_{\text{экв}}) = F_{u_n}(N_{\text{экв}_{n-1}} + N_n). \quad (27)$$

Функции, входящие в формулы (23 ... 27), могут быть получены из диаграммы испытаний на выносливость с помощью той или иной методики статистических оценок и проверены, используя критерии достоверности при заданном уровне значимости.

Применив этот алгоритм, мы можем вычислить математическое ожидание ресурса в эксплуатации с помощью формулы (20) и найти его относительное уменьшение как

$$\varepsilon_p = \frac{MN_{\text{эксн}} - \bar{N}}{\bar{N}}, \quad (28)$$

где  $\bar{N}$  – номинальное значение ресурса, которое должна проработать деталь без учета особенностей её изготовления.

### Выводы.

В настоящей работе рассмотрена оценка качества изделий, содержащих поверхности второго порядка, и подвергающихся циклическим нагрузкам в процессе эксплуатации. Предполагается, что в контексте задачи представляют ненулевую ценность как показатели геометрического соответствия и чистоты, по меньшей мере, на одной из обрабатываемых поверхностей, так и показатели внутренней структуры и ресурса, который может выработать изделие до своего разрушения.

Для оценки их совместного влияния предложена линейная комбинация (1), представляющая скалярное произведение вектора меры дефектов и вектора весовых коэффициентов, учитывающего значимость каждой из мер.

Меры, образующие вектор, отдельно рассмотрены в тексте работы, и для них были получены непосредственные расчетные формулы, для своей оценки требующие как статистических данных по выносливости материала изделий и ходу обработки их ключевых поверхностей, так и проведения измерения напряжений в материале в ходе нагружения детали фиксированным моментом.

При этом для поступившей на контроль детали требуется провести:

- сканирование поверхности на предмет отклонения размеров в различных точках;
- сканирование поверхности для подсчета концентрированных дефектов;
- статическое нагружение с тензометрированием по выделенному контуру для оценки

равномерности внутренней структуры.

Эти измерения могут быть выполнены непосредственно.

Ожидаемая потеря ресурса вследствие технологической усталости вычисляется косвенно на основании кривой выносливости материала, истории изготовления конкретной детали и планируемого её использования. Для типовых изделий данное слагаемое носит характер поправочного коэффициента, который может вычисляться однократно при постоянстве отмеченных условий.

Предложенная методика может работать с прозрачными и непрозрачными изделиями, а также использоваться при проектировании, заменяя экспериментальные данные по нагрузкам некоторыми их аналогами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ/Ф.П. Тарасенко. М.:КноРус, 2013. -224с.
2. Чернышов В.Н. Теория систем и системный анализ/В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов//Тамбов, ТГТУ, 2008. – 94с.
3. Хвастунов Р.М. Методы прогнозирования в квалиметрии машиностроения/Р.М. Хвастунов, О.И. Ягелло, В.М. Корнеева, М.П. Поликарпов//Саратов, Ай Пи Эр Медиа, 2012. – 188с.
4. Неменко А.В. Оценка изменения структуры материала изделия при его механической обработке /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №4(348), С. 164-169.
5. Неменко А.В. Прогноз трещиноустойчивости изделия после механической обработки /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2021, №4(348), С. 170-174.
6. Неменко А.В. Непрямые оценки качества поверхностей второго порядка при финишной обработке/А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2023, №4(360), С.84-89
7. Неменко А.В. Прочностная надежность изделия в зависимости от особенностей финишной обработки /А.В. Неменко, М.М. Никитин//Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2022, - №5(355), - С. 144-149.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +79788330519

E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Старший преподаватель кафедры «Высшая математика»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +79788150316

E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

---

NEMENKO A.V., NIKITIN M.M.

## QUALITY ESTIMATIONS OF PRODUCTS WITH SECOND-ORDER SURFACES

**Abstract.** *Second-order surfaces are wide-spread in parts of machines, housing structures, elements of radio devices and other technical applications. While the accuracy required increases the percentage of finish machining increases too. The finish machining leads to cyclic loading of the surface processed while excessive material is removed. If the object processed will also be cyclically loaded while maintenance then the finish machining will cause the reducing of time to fatigue failure. We consider the quality factors of the parts with second-order surfaces with geometric correspondence, presence of concentrated defects, decreasing of time to fatigue failure. We propose a discrete-continuous measure allowing quantitative estimation of these effects.*

**Keywords:** *parts of machines, second-order surfaces, finishing, technological fatigue, cyclic loading.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Tarasenko F.P. Prikladnoj sistemnyj analiz/F.P. Tarasenko. M.:KnoRus, 2013. -224s.
2. Chernyshov V.N. Teorija sistem i sistemnyj analiz/V.N. Chernyshov, A.V. Chernyshov//Tambov, TGTU, 2008. – 94s.
3. Hvastunov R.M. Metody prognozirovaniya v kvalimetrii mashinostroeniya/R.M. Hvastunov, O.I. Jagello, V.M. Korneeva, M.P. Polikarpov//Saratov, Aj Pi Jer Media, 2012. – 188s.
4. Nemenko A.V. Ocenka izmeneniya struktury materiala izdeliya pri ego mehanicheskoy obrabotke /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2021,№4(348),S. 164-169.
5. Nemenko A.V. Prognoz treshhinoustojchivosti izdeliya posle mehanicheskoy obrabotki /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2021,№4(348),S. 170-174.
6. Nemenko A.V. Nepryamye ocenki kachestva poverhnostej vtorogo porjadka pri finishnoj obrabotke/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2023,№4(360), C.84-89
7. Nemenko A.V. Prochnostnaja nadezhnost izdeliya v zavisimosti ot osobennostej finishnoj obrabotki /A.V. Nemenko, M.M. Nikitin//Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii, 2022,№5(355),S. 144-149.

**Nemenko Aleksandra Vasilyevna**

Federal State Autonomous Educational Foundation «Sevastopol State University», Sevastopol

Ph.D., docent of chair«Digital design »

299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33

Ph.:+79788330519

E-mail:valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

Federal State Autonomous Educational Foundation «Sevastopol State University», Sevastopol

Senior lecturer of chair «Higher Mathematics»

299053, Sevastopol, ul. Universitetskaya, 33

Ph.:+79788150316

E-mail: MMNikitin@sevsu.ru

© Неменко А.В., Никитин М.М., 2025

БУТ А.Ю.

## ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕЛЬНОШТАМПОВАННЫХ ТРОЙНИКОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрен новый подход к оценке эффективности способов изготовления цельноштампованных фитингов типа тройников из трубных заготовок с осадкой магистрали. Для процессов получения подобных деталей введено понятие идеального смещённого объёма. Рассмотрены значение и порядок определения добавочного объёма металла в отводе, для чего приведен ряд аналитических зависимостей. Предложен коэффициент вытяжки отвода при получении упомянутых деталей как отношение добавочного объёма металла в отводе к идеальному смещённому объёму. Он может служить показателем эффективности способов изготовления цельноштампованных тройников. Установлено, что на практике, для известных технологических схем этот коэффициент получается меньше единицы.

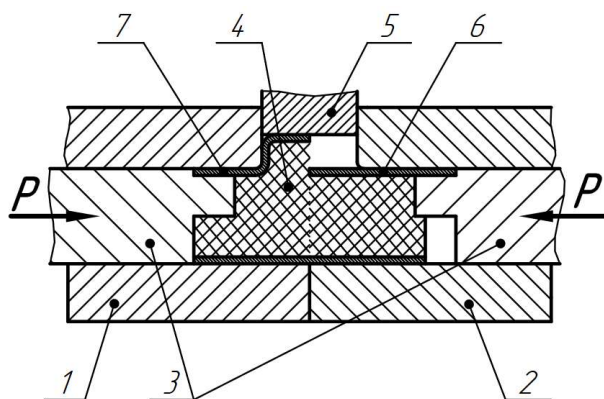
**Ключевые слова:** штамповка, трубная заготовка, тройник, формообразование, эффективность, коэффициент вытяжки, степень деформации.

### Введение

Производство элементов трубопроводной арматуры, таких как тройники и крестовины, – сложный и востребованный технологический процесс, не теряющий свою актуальность на протяжении многих десятилетий. И хотя в настоящее время существует множество вариантов получения таких деталей, включая литьё, листовую гибку со сваркой, прессование и прочие, в промышленности по-прежнему широко применяется штамповка цельных тройников и крестовин из трубных заготовок путём вытяжки или формовки отвода. Это связано с рядом преимуществ, которыми обладают цельноштампованные фитинги: высокое качество и эксплуатационные характеристики, относительная простота изготовления и большая номенклатура типоразмеров. Тройники являются наиболее типичными представителями деталей этого класса, поэтому далее в качестве примера речь пойдёт именно о них.

Типовая схема процесса изготовления цельноштампованного тройника из трубной заготовки представлена на рисунке 1. В общем случае заготовку (зачастую – профилированную), помещённую внутри штампа и заполненную специальным наполнителем (жидкостным, эластичным, сыпучим, жестким, иногда комбинированным – составным, расчётной конструкции и пр.), осаживают с торцов. При этом в соответствующей полости штампа формируется отвод. Процесс формообразования может происходить как в холодном, так и в горячем состоянии, иногда с локальным подогревом областей наиболее интенсивных деформаций (например, [1 – 5] и др.).

К базовым технико-экономическим показателям процесса производства цельноштампованных тройников относятся: достижимые и расчётные габариты (прежде всего высота ответвления), качество (шероховатость поверхности, разнотолщинность, отсутствие дефектов, механические и эксплуатационные характеристики, регламентируемые, в частности, ГОСТ 17380-01 и ГОСТ 32388-2013), производительность, ресурсо- и энергоёмкость. Однако следует отметить, что большинство существующих технологий изготовления этих деталей заданных стандартами типоразмеров (прежде всего ГОСТ 17376-01) не позволяют одновременно достичь высокого уровня всех перечисленных показателей. Они предполагают осуществление нескольких переходов для окончательного формообразования детали и, зачастую, наличие специализированного дорогостоящего оборудования, а также характеризуются значительным (до 25% при изготовлении равнопроходных тройников) объёмом отхода [1, 3, 4 и др.]. Малоизученной остаётся возможность изготовления цельноштампованного тройника, соответствующего требованиям промышленных стандартов, на универсальном оборудовании за один переход с минимальными отходами и трудоёмкостью.



**Рисунок 1 – Типовая схема процесса изготовления цельноштампованного тройника из профилированной трубной заготовки (в качестве примера показан простой эластичный наполнитель):**

1, 2 – левая и правая полуматрицы; 3 – торцевые пуансоны; 4 – эластичный наполнитель – формующий пуансон; 5 – подпор дна отвода; 6 – профилированная трубная заготовка в исходном положении; 7 – заготовка в процессе деформации

Существуют резервы интенсификации процесса, что вызывает дальнейшее совершенствование и конкуренцию конструктивных и технологических схем.

Таким образом, несмотря на многочисленные разработки в области получения тройников, дальнейшие исследования этого процесса и повышение его эффективности являются актуальной и требующей решения задачей.

При этом, в условиях большого разнообразия способов изготовления цельноштампованных тройников, принципиальных схем, специальных устройств и технологических процессов возникает вопрос: как в сравнении можно оценить эффективность многих настолько разных вариантов?

**Цель данной работы** – предложить показатель оценки эффективности способов изготовления цельноштампованных тройников из трубных заготовок.

### Основная часть

Наибольший интерес исследователей традиционно вызывает допустимая степень деформации материала. Именно она даёт представление о граничных возможностях конкретного процесса. Например, всем известен коэффициент вытяжки листового металла [6, 7] – это отношение диаметра детали к диаметру заготовки:  $m = d / D$ . Или коэффициент отбортовки [6, 7] – отношение диаметра отверстия в заготовке к диаметру борта:  $K_o = d_{oms} / D_o$

Таким же универсальным должен быть показатель степени деформации для процесса вытяжки отвода на стенке трубной заготовки.

При описании рассматриваемого процесса полученные тройники часто оценивают по высоте отвода или уже готового ответвления: целевой функцией является наибольшая возможная высота как показатель достижимой степени деформации, естественно, в контексте эксплуатационных характеристик. Но в этом случае должно быть оговорено множество факторов, таких, например, как материал заготовки, её диаметр, длина и толщина стенки (плюс их соотношение), относительный диаметр отвода, термические условия процесса, и прочих. Например, если брать за основу исходную геометрию – допустим, длину заготовки, тогда упускаются другие важные параметры – диаметр и относительная толщина стенки. Кроме того, зачастую используются профилированные заготовки с торцами криволинейной формы (скошенными) для оптимизации картины течения и уменьшения разностенности. В результате попытка совместного учёта даже этих упомянутых параметров в каком-то одном показателе выглядит достаточно сложной задачей.

Таким образом, в ситуации, когда линейные и плоские критерии неэффективны, стоит обратить внимание на объёмные. Представляется очевидным, что более полным показателем рассматриваемого технологического процесса может выступать именно объём металла, перераспределяемого в ходе деформации. И тогда этот объём должен корректно учитываться.

Дальнейшие рассуждения иллюстрирует рисунок 2.

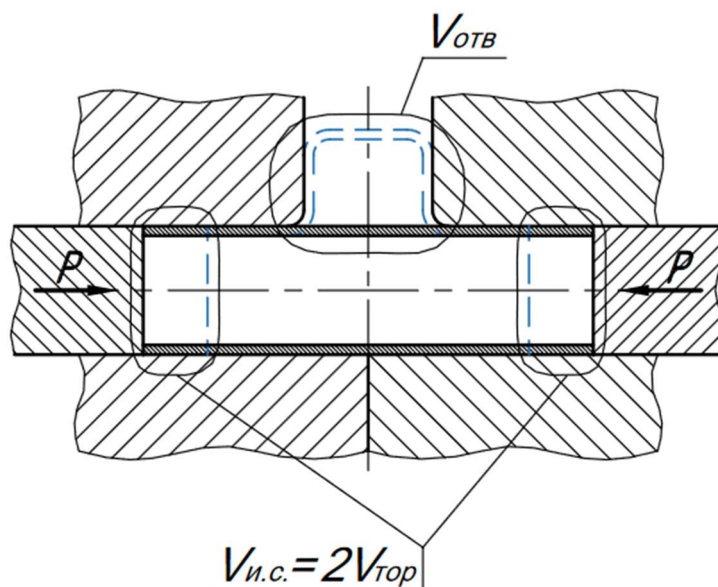


Рисунок 2 – Принципиальная схема осадки трубной заготовки с формированием отвода

Заготовка в процессе осадки с торцов естественным образом укорачивается. Здесь для реализации принципа рассуждений примем допущение, что толщина её стенок не изменяется (фактически это далеко не так вследствие трения) и весь объём металла, смещаемый при осадке, переходит в отвод. Именно этот «теоретический» объём металла, перетекающий в идеальных условиях, и может служить основой для эффективной оценки степени деформации. Назовём его **идеальным смещённым объёмом**. Он легко определяется из условия постоянства объёма и размеров двух цилиндров (усеченных соответствующим образом – при использовании профилированных заготовок) на торцах, «на которые» укоротилась заготовка после осадки (рисунок 2):

$$V_{и.с.} = 2V_{тор}, \quad (1)$$

где  $V_{тор}$  – объём сегмента на торце трубной заготовки.

Далее этот объём может быть сопоставлен с объёмом полученного отвода.

Такая логика позволяет оценить степень деформации, достижимую при том или ином способе штамповки тройника из трубы посредством осадки магистрали, независимо от применяемых конструкций штампов, формирующих пуансонов, конфигураций заготовки, различных материалов, термических и прочих условий процесса.

Естественно, что в реальной картине (при наличии трения) толщина стенок заготовки по сечению существенно изменяется. Этот процесс является достаточно сложным и традиционно изучается на основе конечноэлементных моделей в комбинации с результатами эмпирических исследований. В любом случае, полагаясь на теорию (компьютерные модели) или практику (физические эксперименты), в настоящее время доступно достаточно способов анализа толщины стенок, в частности варианты неразрушающего контроля [8, 9]. В результате объём полученного отвода (или ответвления – в зависимости от цели исследования) может быть определён с учётом изменения толщины стенок и дна, опять же, из очевидных геометрических соотношений участвующих параметров (рисунок 3). К объёму отвода логично относить весь объём металла, возвышающегося над поверхностью магистральной части готового тройника.

В качестве примера приведём формулу определения объёма металла в отводе. Отвод можно представить как результат объединения составляющих его элементарных геометрических фигур (рисунок 3) [6], сумма объёмов которых даёт искомый объём:

$$V_{отв} = V_о^{пл} + V_о^{рад} + V_{цил} + V_{перех}, \quad (2)$$

где  $V_{отв}$  – общий объём металла в отводе;

$V_о^{пл}$  – объём плоского сегмента дна отвода;

$V_{\text{рад}}$  – объём радиального сегмента дна;

$V_{\text{цил}}$  – объём цилиндрической части отвода;

$V_{\text{перех}}$  – объём переходного сегмента от стенки отвода к магистрали тройника.

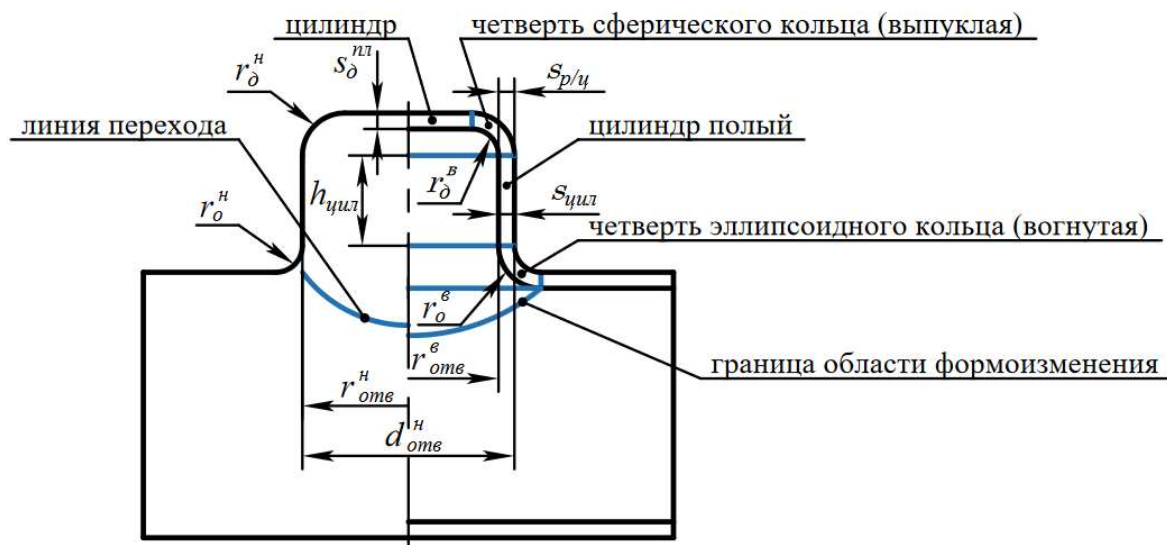


Рисунок 3 – Схема для определения объёма отвода

Рассмотрим определение составляющих выражения (2).

Плоский сегмент дна отвода представляет собой цилиндр малой высоты. Соответственно, при подстановке входящих параметров его объём определяется так:

$$V_{\text{пл}} = \pi \cdot r_{\text{пл}}^{\text{пл}} s_{\text{пл}}^{\text{пл}} = \pi (r_{\text{отв}}^{\text{H}} - r_{\text{отв}}^{\text{ε}})^2 s_{\text{пл}}^{\text{пл}} = \pi (r_{\text{отв}}^{\text{H}} - s_{\text{р/ц}} - r_{\text{отв}}^{\text{ε}})^2 s_{\text{пл}}^{\text{пл}}, \quad (3)$$

где  $r_{\text{пл}}^{\text{пл}}$  – радиус плоского сегмента дна отвода;

$s_{\text{пл}}^{\text{пл}}$  – толщина плоского сегмента дна (при необходимости – усреднённая);

$r_{\text{отв}}^{\text{H}}$  – наружный радиус боковой поверхности отвода (соответствует радиусу отверстия в матрице);

$r_{\text{отв}}^{\text{ε}}$  – наружный радиус соответствующего сегмента дна отвода;

$s_{\text{р/ц}}$  – толщина стенки отвода в месте перехода от радиального сегмента к цилиндрическому;

$r_{\text{отв}}^{\text{ε}}$  – внутренний радиус соответствующего сегмента дна отвода.

Радиальный сегмент дна отвода с достаточной точностью описывается выпуклой четвертью сферического кольца (рисунок 4). Его объём может быть определён по известной формуле вычисления объёма тела вращения (Pappus-Guldin theorem) [10]:

$$V_{\text{рад}} = 2\pi R_{\text{цм}} F_{\text{рад}}, \quad (4)$$

где  $F_{\text{рад}}$  – площадь сечения плоской фигуры, образующей тело – радиального сегмента дна;

$R_{\text{цм}}$  – расстояние от центра масс фигуры до оси вращения.

Указанная площадь  $F_{\text{рад}}$  представляет собой одну четвёртую площади воображаемого кольца, которое можно построить в сечении по наружному и внутреннему радиусам донного участка отвода (рисунок 4) [11]:

$$F_{\text{рад}} = 0,25\pi \left( (r_{\text{отв}}^{\text{H}})^2 - (r_{\text{отв}}^{\text{ε}})^2 \right). \quad (5)$$

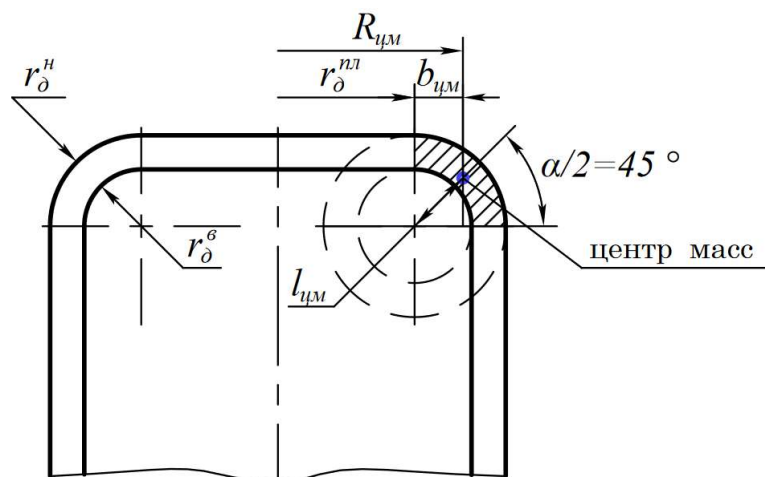


Рисунок 4 – Схема для расчёта радиального сегмента дна отвода

Расстояние от центра масс этого сечения до оси вращения (в данном случае – оси отвода) –  $R_{цм}$  – можно определить с использованием формулы центра масс кольцевого сектора окружности (рисунок 4) [11]. В принятой системе обозначений эта формула будет иметь следующий вид:

$$l_{цм} = \frac{4 \left( (r_{\delta}^H)^3 - (r_{\delta}^6)^3 \right) \sin \frac{\alpha}{2}}{3 \left( (r_{\delta}^H)^2 - (r_{\delta}^6)^2 \right) \alpha}. \quad (6)$$

где  $l_{цм}$  – расстояние в сечении от центра радиального участка дна до центра масс;

$\alpha$  – угол кольцевого сектора, в данном случае равный  $90^\circ$ .

А с учётом приведения к горизонтальной оси (из соотношений сторон прямоугольного треугольника) расстояние смещения центра масс сечения  $b_{цм}$  относительно центра радиального участка дна составит:

$$b_{цм} = l_{цм} \cos \frac{\alpha}{2} = l_{цм} \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Тогда расстояние от центра масс сечения до оси отвода будет равно:

$$R_{цм} = r_{\delta}^{Hл} + b_{цм} = (r_{\delta}^H - r_{\delta}^6) + l_{цм} \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (8)$$

После подстановок и преобразований получаем:

$$R_{цм} = r_{\delta}^{Hл} - r_{\delta}^6 + \frac{(r_{\delta}^6)^3 - (r_{\delta}^H)^3}{2,355 \left( (r_{\delta}^6)^2 - (r_{\delta}^H)^2 \right)}. \quad (9)$$

Следует отметить, что в реальных условиях рассматриваемый сегмент не всегда может иметь строго радиальную кривизну. Основное влияние на его форму оказывает комбинация таких факторов, как принцип, скорость и усилие формообразования, схема подпора дна и пластические характеристики материала заготовки. В этой ситуации расстояние  $R_{цм}$  – можно определять приближенно – принимая его равным внутреннему радиусу отвода  $r_{\delta}^6$ . Вычисления показывают, что данное допущение влияет на результат определения объёма указанного сегмента незначительно.

В итоге имеем:

$$V_{\delta}^{pad} = 0,5 \pi^2 (r_{\delta}^{Hл} - r_{\delta}^6 + b_{цм}) \left( (r_{\delta}^H)^2 - (r_{\delta}^6)^2 \right). \quad (10)$$

Объём цилиндрической части отвода легко найти по формуле для полого цилиндра:

$$V_{цил} = \pi \left( (r_{\delta}^H)^2 - (r_{\delta}^6)^2 \right) \cdot h_{цил}, \quad (11)$$

где  $h_{цил}$  – высота цилиндрической части отвода (рисунок 3).

Для этого необходимо знать толщину стенки отвода  $s_{\text{цил}}$ , например, её усреднённое значение.

Переходной сегмент от цилиндрической части отвода к магистрали представляет трудность с точки зрения аналитического определения его объёма. Его кривизна изменяется от  $r_o^H$ ,  $r_o^6$  в плоскости продольного сечения до минимальной в плоскости поперечного сечения (для равнопроходных тройников в крайних точках она отсутствует). И форма этого сегмента будет варьироваться в зависимости от соотношения диаметров отвода и магистрали. В результате наиболее рациональным представляется определение его объёма  $V_{\text{перех}}$  средствами САПР путём адаптивного параметрического моделирования. Для приближённых аналитических расчётов можно принимать выражение, использованное для четверти сферического кольца (с допущением его развёртывания), но длину траектории движения плоского формирующего контура определять по эллиптической кривой, что будет пояснено ниже.

При расчёте также следует учитывать объём металла – части стенки трубной заготовки, который был изначально в той области, где формируется отвод: его нужно вычесть из объёма металла в полученном отводе (рисунок 5).

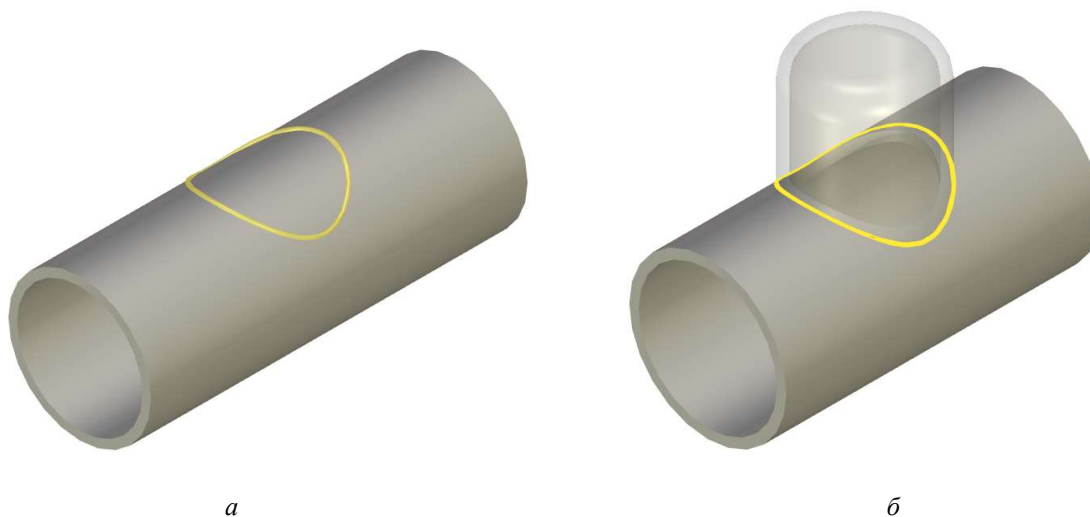


Рисунок 5 – 3D-модели заготовки (а) и тройника (б) с иллюстрацией части поверхности трубы, на которой формируется отвод

В общем случае, когда пересекаются цилиндры разных диаметров (переходные тройники), площадь указанного сегмента ограничена сложной пространственной кривой. В работе [12] показана возможность аппроксимации фронтальной проекции этой кривой частью окружности (рисунок 6). При этом её длина также с достаточной точностью может быть аппроксимирована эллиптической кривой.

Площадь эллипса определяется по известному выражению [11]:

$$F_{\text{э}} = \pi ab. \quad (12)$$

где  $b$  – длина малой полуоси, которой в рассматриваемом случае выступает радиус меньшего из цилиндров – отвода в сумме с наружным радиусом основания отвода:  $r_{\text{отв}}^H + r_o^H$ ;

$a$  – длина большой полуоси, которая может быть определена как половина дуги  $l$  окружности радиусом  $R$  (радиус заготовки / магистрали), соединяющей наиболее удалённые точки рассматриваемой пространственной кривой. Эта пара точек, принимаемых для определения большой оси эллипса, получается проецированием контура отвода на поверхность магистрали (рисунок 7).

В результате для случая переходного тройника приближённый объём сегмента стенки трубной заготовки в основании отвода, аппроксимированного эллиптическим контуром, может быть определён с учётом длины дуги  $l$  по формуле:

$$V_c^{перех} = \pi a b s = \pi \frac{1}{2} l (r_{омв}^H + r_o^H) s_0 = \pi \frac{1}{2} R^H \theta (r_{омв}^H + r_o^H) s_0, \quad (13)$$

где  $r_o^H$  – радиус перехода магистрали в отвод (фактически – радиус матрицы в сечении продольной плоскостью симметрии) (рисунок 3);

$s_0$  – толщина стенки трубной заготовки;

$R^H$  – наружный радиус трубной заготовки / магистрали тройника;

$\theta$  – центральный угол дуги, выраженный в радианах.

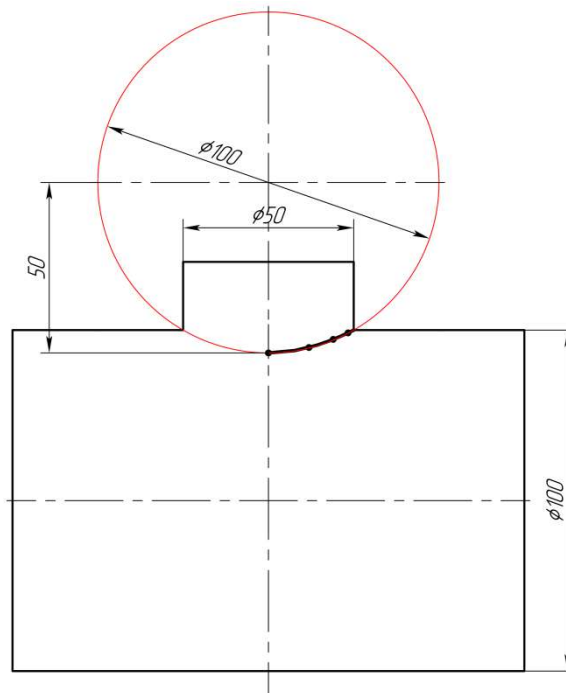


Рисунок 6 – Схема аппроксимации фронтальной проекции линии пересечения (гиперболы) дугой окружности [12]

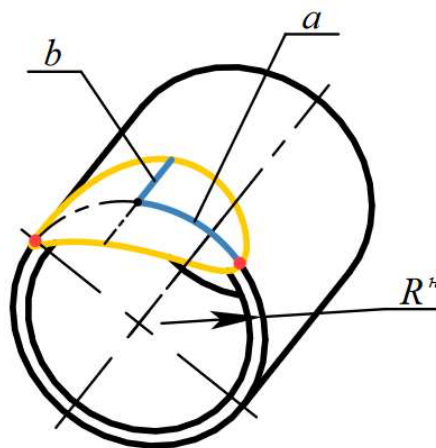


Рисунок 7 – Схема к определению размеров пространственной кривой в основании отвода

В случае равнопроходного тройника форма этого сегмента стенки трубы (рисунок 8) определяется с учётом теоремы Г. Монжа [13] и понятия о теле Штейнмеца (бицилиндре) [14]. Тогда его объём может быть определён как разность объёмов тел пересечения двух цилиндров (магистрали и отвода), вычисленных соответственно по наружному и внутреннему радиусам трубной заготовки:

$$V_c^{равн} = \frac{4}{3} (R^H)^3 - \frac{4}{3} (R^{вн})^3, \quad (14)$$

где  $R^{вн}$  – внутренний радиус трубной заготовки.

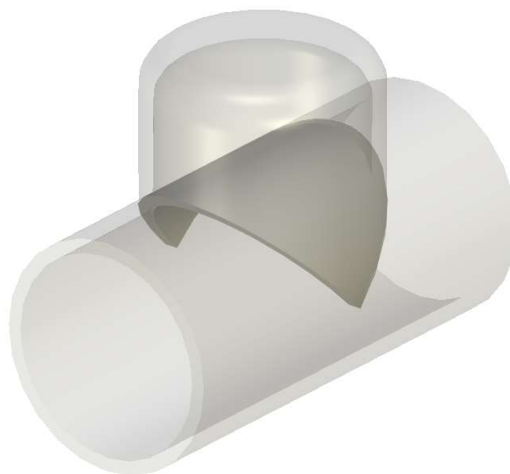


Рисунок 8 – Сегмент стенки трубной заготовки в основании отвода равнопроходного тройника

Для более точного определения объёма сегмента трубы под отводом, как и для реализации всей методики расчёта, могут быть использованы средства современных САПР.

Таким образом, представляет интерес именно **добавочный объём** металла в отводе – «пришедший» из осаженной части магистрали:

$$V_{отв}^{доб} = V_{отв} - V_c. \quad (15)$$

Приведенные выше выражения, описывающие базовые зависимости основных параметров, могут быть преобразованы для оптимизации модели расчёта в конкретных условиях.

В результате **коэффициент вытяжки отвода** при изготовлении цельноштампованных тройников может быть определён как отношение добавочного объёма металла в полученном отводе к идеальному смещённому объёму в магистральной части тройника:

$$K_B^{отв} = \frac{V_{отв}^{доб}}{V_{и.с.}}. \quad (16)$$

На практике не весь смещённый объём переходит в отвод: какая-то его часть (в зависимости от применяемой технологии и схемы деформирования) идёт на утолщение стенок магистрали (обычно стремятся минимизировать такое утолщение). То есть  $V_{отв}^{доб}$  получается меньше, чем  $V_{и.с.}$ . Значит коэффициент вытяжки отвода в реальных условиях (для известных на данный момент технологических схем) будет меньше единицы:

$$K_B^{отв} < 1. \quad (17)$$

### Заключение

Таким образом, приведенные рассуждения и зависимости могут быть основой для определения коэффициента вытяжки отвода в процессе штамповки цельного тройника с применением осадки магистрали.

Данный коэффициент, в свою очередь, может служить критерием сравнительной оценки эффективности способов изготовления цельноштампованных тройников.

Для практического использования описанной методики целесообразно создание расчётной модели определения коэффициента вытяжки отвода на базе САПР. Входными данными в ней должны выступать геометрические параметры заготовки и полученного тройника, включая результаты замеров толщины в контрольных точках изделия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация технологических параметров гидроформовки т-образного переходника методом Тагучи / Д. Х. Чан, В. Т. Нгуен, М. Т. Нгуен, В. Ж. Лыонг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 527–534.

2. Исследование и моделирование процессов горячей штамповки равнопроходного тройника диаметром 530 мм, получаемого из стали 10Г2ФБЮ / В. В. Грязнов, Д. А. Кормаков, Е. Н. Меркушев [и др.] // Ученые Омска – региону: Материалы VI Региональной научно-технической конференции, Омск, 24–26 мая 2021 года / Под общей редакцией Л.О. Штриплинга. – Омск: Омский государственный технический университет, 2021. – С. 15–19.
3. Гаврилов, Р. В. Способы и особенности изготовления горловин в стальных заготовках / Р. В. Гаврилов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 7. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 22–26.
4. Design of T-shaped tube hydroforming using finite element and artificial neural network modeling / F. Abbassi, F. Ahmad, S. Gulzar S., T. Belhadj, A. Karrech, H. Soap Choi // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Volume 34(2). PP. 1129–1138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0214-4>.
5. Cui, Xiao-Lei. Hydroforming process of complex T-shaped tubular parts of nickel-based superalloy / Xiao-Lei Cui, B. Teng, S. Yuan // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. Volume 32. PP. 476–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.02.001>.
6. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
7. Ковка и штамповка: справочник в 4 томах / Общ. ред. Е. И. Семенов. Т. 4: Листовая штамповка / Ред. С. С. Яковлев. – 2-е издание, дополненное и переработанное. – Москва: Машиностроение, 2010. – 731 с.
8. Могильнер, Л. Ю. Обследование металлоконструкций на площадочных объектах магистральных трубопроводов / Л. Ю. Могильнер, Д. А. Неганов, Н. Н. Скуридин. – Москва: Рекламно-издательский центр "ТЕХНОСФЕРА", 2023. – 440 с.
9. Рябчиков, П.В. Повышение достоверности результатов контроля трубопроводов после реализации мероприятий по управлению надёжностью / П.В. Рябчиков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 5(367). – С. 91–97.
10. Math24.net. Pappus Theorem. Режим доступа: <https://math24.net/pappus-theorem.html> (дата обращения: 17.11.2024).
11. Инженерный справочник. Вычисление элементов плоских фигур. Режим доступа: <https://dpva.ru/Guide/GuideMathematics/PerimSqVolGradRad/SquaresOfPlainFigures/FlatFiguresCalculation/> (дата обращения: 17.11.2024).
12. Бут, А. Ю. О возможности аппроксимации проекции линии взаимного пересечения цилиндров дугой окружности / А. Ю. Бут // Строительство и техногенная безопасность. – 2023. – № 29(81). – С. 107–113.
13. Середа, В. Г. Зависимость вида линии пересечения поверхностей от их комбинаций / В. Г. Середа, А. Ю. Бут // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 30–36.
14. Wolfram MathWorld. Steinmetz Solid. Режим доступа: <https://mathworld.wolfram.com/SteinmetzSolid.html> (дата обращения: 17.11.2024).

**Бут Александр Юрьевич**

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровое проектирование»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел.: +7 (8692) 41-77-41  
E-mail: [aybut@sevsu.ru](mailto:aybut@sevsu.ru)

BUT A.YU.

## PERFORMANCE INDICATOR OF MANUFACTURING METHODS FOR SOLID-STAMPED TEES

**Abstract.** *The article discusses a new approach to evaluating the efficiency of manufacturing methods for solid-stamped fittings such as tees from pipe blanks with a main precipitation. The concept of ideal displaced volume is introduced for the processes of obtaining such parts. The meaning and procedure for determining the additional volume of metal in the bend are considered, for which a number of analytical dependencies are given. The coefficient of drawing the bend when obtaining the above-mentioned parts is proposed as the ratio of the additional volume of metal in the bend to the ideal displaced volume. It can serve as an indicator of the efficiency of manufacturing methods for solid-stamped tees. It is determined that in practice, for known process flow charts, this coefficient is less than one.*

**Keywords:** *stamping, pipe blank, tee, shaping, efficiency, coefficient of drawing, deformation degree.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Optimizaciya tehnologicheskikh parametrov gidroformovki t-obraznogo perehodnika metodom Taguchi [Optimization of technological parameters of hydroforming of tee-shaped adapter by Taguchi method] / D. H. Chan, V. T. Nguen, M. T. Nguen, V. Zh. Lyong // *Izvestiya Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. – 2020. – No. 12, pp. 527–534.
2. Issledovanie i modelirovanie processov goryachej shtampovki ravnoprohodnogo trojnika diametrom 530 mm, poluchaemogo iz stali 10G2FBYu [Research and modeling of hot stamping processes of equal-bore tee with diameter 530 mm, obtained from steel 10G2FBYu] / V. V. Gryaznov, D. A. Kormakov, E. N. Merkushev [i dr.] // *Uchenye Omska – regionu: Materialy VI Regionalnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, Omsk, 24–26 maya 2021 goda / Pod obshej redakciej L.O. Shtriplinga. – Omsk: Omskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet, 2021, pp. 15–19.
3. Gavrilov, R. V. Sposoby i osobennosti izgotovleniya gorlovin v stalnyh zagotovkah [Methods and features of manufacturing necks in steel blanks] / R. V. Gavrilov // *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shuhova, posvyashennaya 170-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shuhova: Sbornik dokladov*, Belgorod, 16–17 maya 2023 goda. Tom Chast 7. – Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2023, pp. 22–26.
4. Design of T-shaped tube hydroforming using finite element and artificial neural network modeling / F. Abbassi, F. Ahmad, S. Gulzar S., T. Belhadj, A. Karrech, H. Soap Choi // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020. Volume 34(2). PP. 1129–1138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0214-4>.
5. Cui, Xiao-Lei. Hydroforming process of complex T-shaped tubular parts of nickel-based superalloy / Xiao-Lei Cui, B. Teng, S. Yuan // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Volume 32. PP. 476–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.02.001>.
6. Romanovskij, V. P. Spravochnik po holodnoj shtampovke [Cold Stamping Reference Book] / V. P. Romanovskij. – Leningrad: Mashinostroenie, 1979. – 520 p.
7. Kovka i shtampovka: spravochnik v 4 tomah [Forging and stamping: a reference book in 4 volumes] / Obsh. red. E. I. Semenov. T. 4: Listovaya shtampovka / Red. S. S. Yakovlev. – 2-e izdanie, dopolnennoe i pererabotannoe. – Moscow: Mashinostroenie, 2010. – 731 p.
8. Mogilner, L. Yu. Obsledovanie metallokonstrukcij na ploshadochnykh obektah magistralnykh truboprovodov [Inspection of metal structures at site facilities of main pipelines] / L. Yu. Mogilner, D. A. Neganov, N. N. Skuridin. – Moskva: Reklamno-izdatelskij centr "TEHNOSFERA", 2023. – 440 p.
9. Ryabchikov, P.V. Povyshenie dostovernosti rezultatov kontrolya truboprovodov posle realizacii meropriyatij po upravleniyu nadyozhnostyu [Increasing the reliability of pipeline inspection results after implementing reliability management measures] / P.V. Ryabchikov // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii*. – 2024. – No. 5(367), pp. 91–97.
10. Math24.net. Pappus Theorem. Available at: <https://math24.net/pappus-theorem.html> (date of access: 17.11.2024).
11. Inzhenernyj spravochnik. Vychislenie elementov ploskikh figure [Flat Figures Calculation]. Режим доступа: <https://dpva.ru/Guide/GuideMathematics/PerimSqVolGradRad/SquaresOfPlainFigures/FlatFiguresCalculation/> (дата обращения: 17.11.2024).
12. But, A. Yu. O vozmozhnosti approksimacii proekcii linii vzaimnogo peresecheniya cilindrov dugoj okruzhnosti [On the possibility of approximation of the cylinders intersection line projection with a circular arc] / A. Yu. But // *Stroitelstvo i tehnogennaya bezopasnost*. – 2023. – No. 29(81), pp. 107–113.
13. Sereda, V. G. Zavisimost vida linii peresecheniya poverhnostej ot ih kombinacij [Traces type dependence on combinations of the surfaces] / V. G. Sereda, A. Yu. But // *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. – 2021. – Volume 7, No. 2, pp. 30–36.
14. Wolfram MathWorld. Steinmetz Solid. Available at: <https://mathworld.wolfram.com/SteinmetzSolid.html> (date of access: 17.11.2024).

**But Aleksandr Yurievich**

Sevastopol State University, Sevastopol

PhD, associate professor of the department «Digital design»

299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33

Ph.: +7 (8692) 41-77-41

E-mail: [aybut@sevsu.ru](mailto:aybut@sevsu.ru)

© Бут А.Ю., 2025

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 67.019

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-369-1-33-39

УТЕНКОВ В.М., ИВАНОВ В.А., ГОНЧАРОВ А.А.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧЕЙ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ**

**Аннотация.** В статье отображена актуальность проведения диагностических работ вращающихся печей. Даны рекомендации по перечню необходимых работ при обследовании. Особое внимание уделено вопросу построения комплексной трёхмерной модели и подчеркнута её информативность для определения комплекса необходимых восстановительных работ.

**Ключевые слова:** Цементная печь, горячая выверка, трехмерная модель, бандаж, ролики, диагностика, деформация, прямолинейность, лазерный дальномер.

#### **Введение**

Вопросы, связанные с определением пространственного положения крупногабаритных вращающихся производственных объектов, являются в настоящее время особенно актуальными. К таким объектам относятся обжиговые цементные печи, длина которых достигает 200 м и более.

Предлагаемая в статье методика построения 3D модели подобных объектов обеспечивает определение возможных искажений корпуса и связанных с этим отклонений положения опорных узлов, т.е. бандажей и роликов, а также дефектов внутренней футеровки.

Моделирование истинного положения корпуса вращающейся печи позволяет оперативно определять дефекты и своевременно устранять их для обеспечения эксплуатации цементных печей, ибо в условиях интенсивного строительства в нашей стране производство цемента является важной народнохозяйственной задачей.

#### **Основная часть**

Необходимым условием нормальной работы вращающейся печи является прямолинейность ее оси вращения. Искривления оси даже в пределах допуска вызывают повышенный износ бандажей, опорных роликов и их подшипников, увеличивают расход энергии, затрачиваемой на вращение печи, ускоряют разрушение огнеупорной футеровки и металлического корпуса.

В качестве замены традиционных методов выверки прямолинейности оси вращения печи, использующих стандартные геодезические инструменты (проволочная струна, оптический луч, гидростатический нивелир, зенит-надир приборы и др.), применяется координат определяющая технология, обладающая существенно большей гибкостью и позволяющая с высокой точностью определять геометрические характеристики крупных объектов сложной формы.

Анализ пространственных координат точек, определенных на рабочих поверхностях ответственных механизмов печи, позволяет судить о взаимном их расположении, ориентации, напряжениях и деформациях конструкции, а также контролировать величину перемещения в режиме реального времени.

На рисунке 1 представлен перечень работ при обследовании вращающейся печи.

Для комплексной оценки состояния цементных печей статические наблюдения необходимо дополнить измерениями в динамике. Суть бесконтактной технологии контроля геометрии вращающихся печей без их остановки («горячая выверка») заключается в измерении с большой частотой (до 6000 Гц) расстояния до поверхности бандажа, опорных роликов, венцовой и подвенцовой шестерен специальными предварительно закоординированными, лазерными дальномерами. Точность измерения расстояний  $\pm 1,5$  мм. Поскольку измерения на каждом элементе в системе «бандаж и два опорных ролика» производятся синхронно, появляется возможность проанализировать взаимное влияние на положение центра бандажа отклонений формы самого бандажа, его опорных роликов и эксцентриситетов этих элементов. При проведении измерений одновременно на нескольких

бандажах появляется возможность получения реальной пространственной геометрии печи в рабочих условиях.

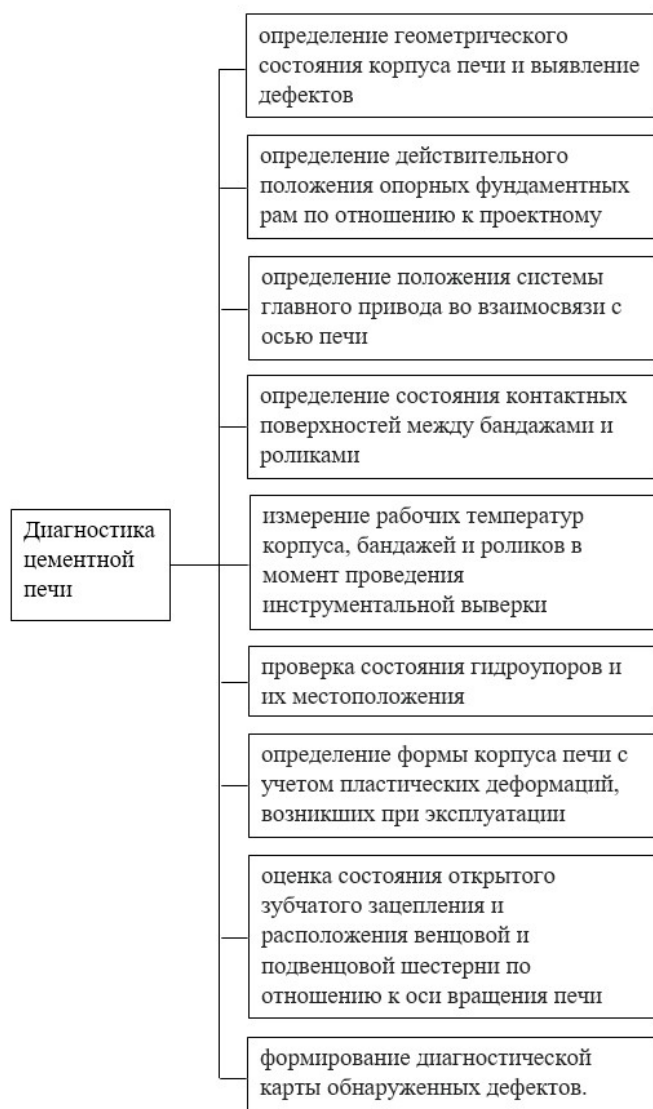


Рисунок 1- Перечень работ при обследовании вращающейся печи

Информативность «горячей» выверки гораздо выше, чем других методов, т.к. измерений выполняется гораздо больше. Измерения выполняются, лазерным дальномером по сечениям объекта, при этом фиксируется время каждого измерения. Горячая выверка позволяет определить геометрические характеристики:

- 1) Геометрические центры роликов, бандажей, секций обечайки;
- 2) Направление геометрических осей элементов в пространстве;
- 3) Радиусы и конусность, и форму элементов;
- 4) Прямолинейность оси агрегата в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

Кинематические характеристики:

- 1) Несовпадение геометрических центров и центров вращения;
- 2) Аксиальное и радиальное биение элементов агрегата.

Анализ изменения расстояний, измеренных отдельным дальномером, позволяет оценить радиальные и осевые биения элементов, определить отклонения формы и эксцентриситет. Сделав подобное обследование регулярным, можно вовремя диагностировать недопустимые изменения геометрических характеристик корпуса и избежать связанных с этим аварийных остановок.

Трехмерное моделирование и анализ деформаций по пространственным данным в инженерно-геодезической и маркшейдерской практике стало возможным благодаря развитию программно-технических комплексов и применению современной измерительной и

вычислительной техники. Для определения геометрических параметров инженерных сооружений можно использовать наземные лазерные дальномеры.

Пространственное положение инженерных сооружений вообще, и промышленного оборудования в частности, как правило, определяют способом полярной съемки на основе угловых и линейных измерений. На рисунке 2 показаны измерения:  $\beta_i$  – горизонтальный угол;  $v_i$  – угол наклона;  $S_i$  – наклонное расстояние до определяемой точки  $i$ .

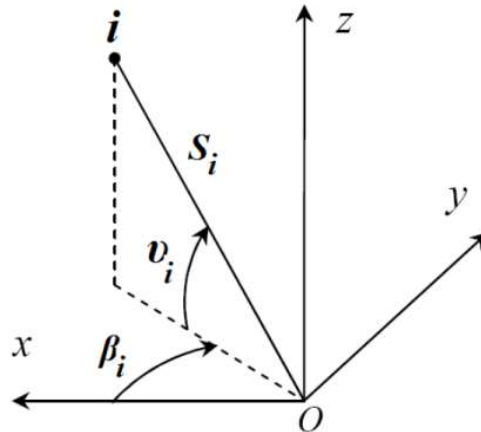


Рисунок 2 - Определение пространственного положения точки  $i$

Для построения вращающейся печи в 3 D необходимо с помощью лазерного дальномера получить координаты точек, придерживаясь определённой методике, показанной на рисунке 3.



Рисунок 3 - Процесс построения корпуса вращающейся печи в 3D

Первым этапом диагностических работ является изучение профиля корпуса печи. Для обжиговой печи № 1 на заводе “Невьянский Цементник” Холдинга “ЕВРОЦЕМЕНТ ГРУП” он определялся по 39 сечениям, расстояние между которыми для удобства определяется между сварными швами на обечайке, но по необходимости можно выполнить измерения для любого числа сечений (рисунок 4). Также по согласованию с заказчиком для некоторых сегментов корпуса интервал между сечениями может быть не таким, как для других (например, можно предусмотреть сечения через каждый метр, для каждого шва и т. д.).

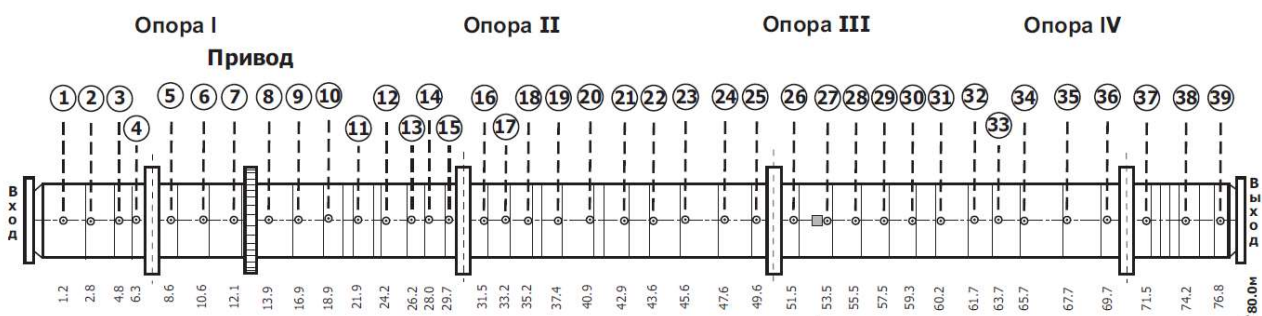


Рисунок 4 - Позиции секций для измерения профиля корпуса

Определение координат поперечных сечений корпуса и срединных сечений бандажей может производиться с помощью автоматизированной лазерной измерительной системы не менее чем в 32-х точках равномерно по периметру сечения. Система координат представлена на рисунке 5.

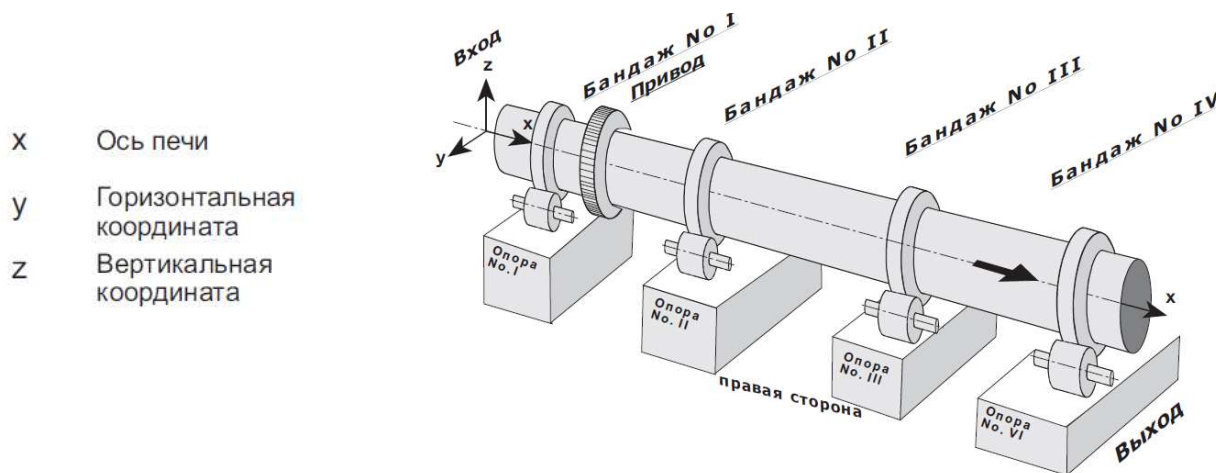


Рисунок 5 - Система координат

Это количество измерений обусловлено необходимостью плавности построения 3D модели и большей наглядности, и информативности. Определяется расстояние до точки и время считывания сигнала с лазерного дальномера (рисунок 6.).

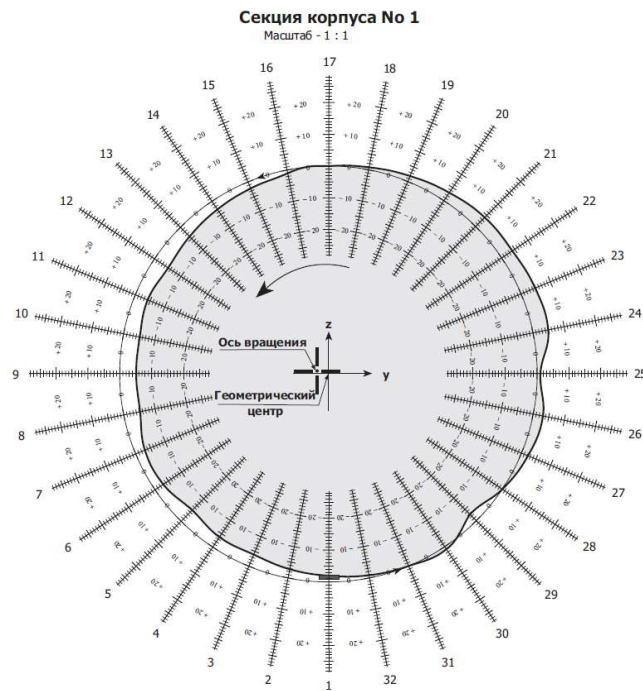


Рисунок 6 - Процесс съёмки лазерным дальномером

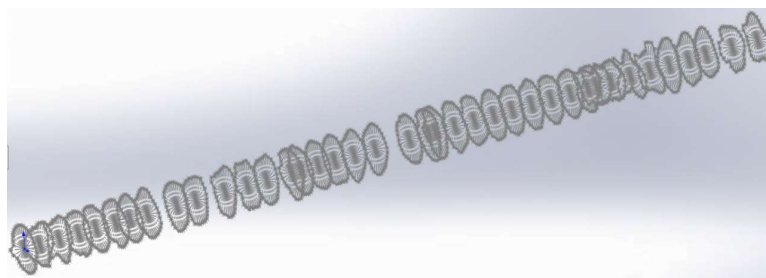
Данные, содержащие информацию о расстоянии и времени прохождения сигнала, полученные с лазерного дальномера фиксировались в накопителе Workbot в виде текстового файла. Затем был выполнен расчёт значений для дальнейшего построения сечений с помощью специализированной программы для автоматизации геометрического моделирования и инженерно-графических работ. В итоге создается радиальная диаграмма деформаций (рисунок 7), отражающая значение и направление эксцентricности корпуса печи по отношению к оси вращения.

Аналогичным образом формируются остальные сечения необходимые для полного построения 3 D модели.

Используя полученные в итоге 39 радиальных диаграмм, можно осуществить построение трёхмерной модели в программе SolidWorks. В ней строятся первоначально справочные плоскости на расстоянии друг от друга, соответствующем расстояниям между сварными швами на обечайке, по которым велись замеры. На эти плоскости переносятся все 39 сечений, построенные по 32 точкам (рисунок 8).

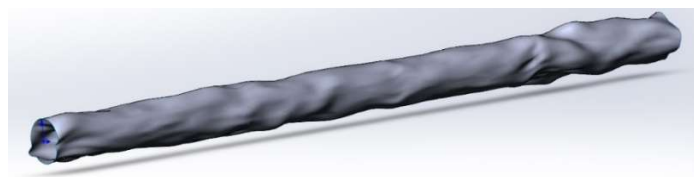


*Рисунок 7 - Радиальная диаграмма деформаций в сечении №1*

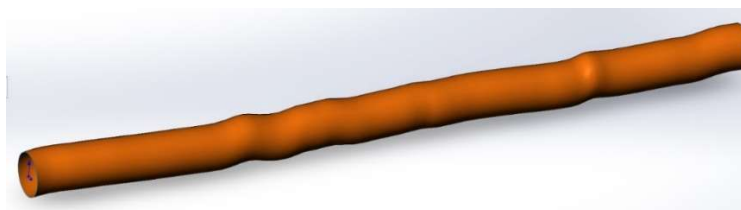


*Рисунок 8 - Эскизы сечений, полученных по результатам съёмки лазерным дальномером*

На следующем этапе идет формирование поверхности по траектории сечений (рисунок 9). Данная трёхмерная модель позволяет определить состояние корпуса печи, наличие на нем «горбов», а также отклонение его геометрического центра от оси вращения печи.

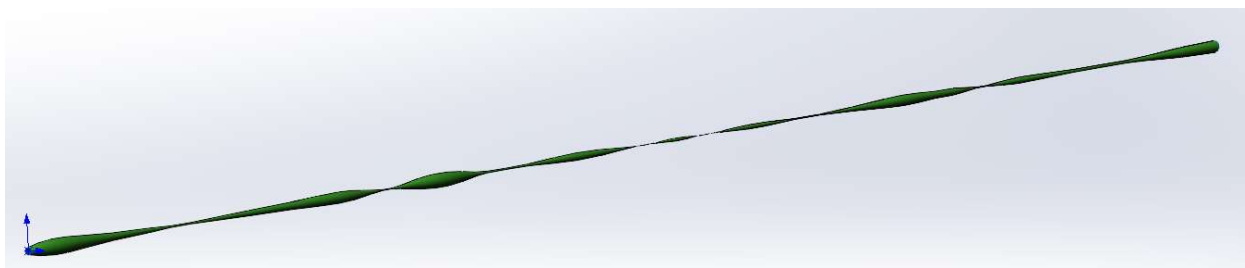


*Рисунок 9- 3D-модель геометрической поверхности цементной печи*



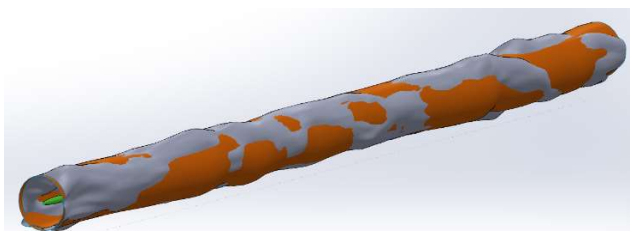
*Рисунок 10 - 3D-модель эксцентриситеты корпуса печи по отношению к оси вращения*

Аналогичным образом, по полученным данным об отклонении оси вращения от геометрического центра строится 3D-модель эксцентриситеты корпуса печи (рисунок 10) и модель радиальных биений корпуса (рисунок 11).



*Рисунок 11 - 3D - модель радиальных биений корпуса*

Объединив эти модели в единую можно осуществить визуализацию деформаций, которые имеет цементная печь (рисунок 12).



*Рисунок 12- Единая трёхмерная модель визуализации деформации*

Измерения геометрии корпуса печи с использованием линейного лазерного сканирования позволяют точно визуализировать деформацию корпуса. Более ранние методические разработки не давали возможности смоделировать взаимосвязь циклической деформации, радиального биения корпуса, бандажей и радиального биения привода. В итоге разработан способ, позволяющий отражать все эти параметры одновременно на единой трехмерной модели визуализации деформации, которая соответствует мировому уровню среди аналогичных решений.

В результате появилась возможность проанализировать состояние геометрии корпуса и его связь с бандажами и приводом на экране монитора. Разработанная модель вращается так же, как реальная печь, ее можно легко повернуть, рассмотреть со всех сторон. Но самым важным преимуществом данного подхода является возможность оценки состояния печи, планирования необходимых ремонтов и замены оборудования, определения участка печи для коррекции и оценки его влияния на бандажи и привод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров Д.В., (Иванов А.В.), Обзор программных продуктов для обработки данных наземного лазерного сканирования. ГЕО-Сибирь-2005, Научный конгресс: сб. материалов в 7 томах (Новосибирск, 25-29 апреля 2005г.): СГГА, т.1.-с.205-206.
2. Неволлин А.Г., Медведская Т.М. Обработка результатов наземного лазерного сканирования, с учетом коэффициента отражения сигнала. Вестник СГГА.-2014.-Вып.1(25).-с.47-53
3. Середович А.В., Комиссаров Д.В., Широкова Т.А. Наземное лазерное сканирование. Монография.- Новосибирск: СГГА, 2009,-261с.
4. Середович А.В., Миртахудинов А.Р., Иванов А.В. Измерение колебаний инженерных объектов на основе данных наземного лазерного сканирования. ИнтерэкспоГЕО-Сибирь-2013. IX международный научный конгресс: Международн. научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3т. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013г.): СГГА, 2013, т.2, с. 137-139.
5. Могильный С.Г., Шоломицкий А.А. и др. Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ.-2018.-№3.-с.89-107.
6. Жуков Б.Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации [Текст] – Новосибирск: СГГА, 2004.-376с.
7. Неволлин А.Г. 3D- моделирование крупногабаритных промышленных агрегатов с помощью программного комплекса CYCLONE[Текст] / А.Г. Неволлин, Т.М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVМеждунар. науч. конгр., 24-26 апреля 2019г., Новосибирск [Текст]: сб. материалов в 9т. Т.1: Междунар. науч. Конф. «Геодезия, Геоинформатика, картография, маркшейдерия». - Новосибирск: СГУГиТ, 2019. №1-С.223-230.
8. CycloneCloudWorxforAutoCAD& Bentley CloudWorx [Электронный ресурс]: сайт компании Leica Geosystem AG.-Режим доступа: [http://www.leicageosystem.com/hds/en/lgs\\_6517.htm](http://www.leicageosystem.com/hds/en/lgs_6517.htm).

**Утенков Владимир Михайлович**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Москва  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки»  
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5  
E-mail: utencov@bmstu.ru

**Иванов Вячеслав Александрович**  
Российский государственный университет туризма и сервиса  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая школа сервиса»  
141221 Московская обл., Пушкинский р-н, пос. Черкизово, ул. Главная, д.99  
E-mail: master777k@mail.ru

**Гончаров Андрей Александрович**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана г. Москва, инженер II категории кафедры «Металлорежущие станки»  
105005, 2-я Бауманская ул., д. 5  
E-mail: a.goncharov.mit@mail.ru

UTENKOV V.M., IVANOV V.A., GONCHAROV A.A.

## SIMULATION OF THE POSITION OF ROTATING CEMENT KILNSIN ORDER TO IDENTIFY MALFUNCTIONS

**Abstract.** *The article shows the relevance of diagnostic work on rotating kilns. Recommendations are given on the list of necessary work during the examination. Special attention is paid to the issue of constructing a complex 3D model and its informative value for determining the complex of necessary restoration works is emphasized.*

**Keywords:** *Cement kiln, hot alignment, 3D model, tite, rollers, diagnostics, deformation, straightness, laser rangefinder.*

### BIBLIOGRAPHY

1. D. Komissarov.V., (Ivanov A.V.), Review of software products for processing nasal laser scanning data. GEO-Siberia-2005, Scientific Congress: collection of materials in 7 volumes (Novosibirsk, April 25-29, 2005): Siberian State Geodetic Academy, vol.1.-pp.205-206.
2. Nevolin A.G., Medvedskaya T.M. Processing of the results of nasal laser scanning taking into account the reflection coefficient of the signal Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy. - 2014.-Issue.1(25). - pp.47-53
3. A. Seredovich.V., Komissarov D.V., Shirokova T.A. Ground-based laser scanning. Monograph. Novosibirsk: Siberian State Geodetic Academy, 2009, 261s.
4. A. Seredovich.V., Mirtakhudinov A.R., Ivanov A.V. Measurement of vibrations of engineering objects based on nasal laser scanning data. Interexpo GEO-Siberia-2013. IX International Scientific Congress. scientific conference "Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying": collection of materials in 3t. (Novosibirsk, April 15-26, 2013): Siberian State Geodetic Academy, 2013, vol. 2, pp. 137-139.
5. Mogilny S.G., Sholomitsky A.A., etc. Investigation of methods for determining the geometric parameters of operating units using this laser scanning. Bulletin of the SSUGT.-2018.-No.3.-pp.89-107.
6. Zhukov B.N. Guidelines for geodetic control of cooperation and development of industrial enterprises during their operation [Text] – Novosibirsk: Siberian State Geodetic Academy, 2004.-376c.
7. Nevolin A.G. 3D modeling of large-sized industrial units using the CYCLONE software package [Text] / AG. Nevolin, T.M. Medvedskaya // Interexpo GEO-Siberia. XV century. Scientific conference, April 24-26, 2019, Novosibirsk [Text]: collection of materials in 9t. Vol.1: World. scientific. Conf. "Geodesy, Geoinformatics, cartography, surveying". Novosibirsk: SSUGT., 2019. No.1-pp.223-230.
8. Cyclone CloudWorx for AutoCAD & Bentley CloudWorx [Electronic resource]: website: Leica Geosystem AG.-Access mode: [http://www.leicageosystem.com/hds/en/lgs\\_6517.htm](http://www.leicageosystem.com/hds/en/lgs_6517.htm).

**Utenkov Vladimir Mikhailovich**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Metal Cutting machines"  
105005, 2nd Baumanskaya str., 5  
E-mail: utencov@bmstu.ru

**Ivanov Vyacheslav Alexandrovich**  
Russian State University of Tourism and Service  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department "Higher School of Service"  
141221 Moscow region, Pushkinsky district, Cherkizovo village, Glavnayastr., 99  
E-mail: master777k@mail.ru

**Goncharov Andrey Alexandrovich**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, engineer of the II category of the department "Metal Cutting machines"  
105005, 2nd Baumanskaya str., 5  
E-mail: a.goncharov.mit@mail.ru

© Утенков В.М., Иванов В.А., Гончаров А.А., 2025

КОНОНЕНКО А.С., НОТФУЛЛИН И.Ф.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Аннотация.** Рассмотрено влияние конструкционных и технологических параметров на герметизирующую способность фланцевых соединений. Теоретически обосновано обеспечение герметичности фланцевых соединений при отсутствии уплотнителей созданием высокого контактного давления на поверхности фланцев и использование промежуточных уплотнительных элементов с небольшим модулем упругости.

**Ключевые слова:** Фланцевое соединение, герметичность, фланец, герметизирующая способность, микроканал, технологическая среда, уплотнитель.

### Введение

На долговечность и эффективность работы машин и оборудования значительное влияние оказывает герметичность фланцевых соединений, из-за нарушения которой ухудшаются условия смазки сопряженных трущихся поверхностей, смазочные материалы засоряются абразивными частицами, что увеличивает интенсивность изнашивания и снижает долговечность деталей. Повышение степени герметичности соединений способствует снижению расхода топливосмазочных материалов, повышению ресурса деталей и уменьшению отрицательного влияния машин на экологическую обстановку.

Работоспособность любого фланцевого соединения зависит от большого количества факторов, которые можно объединить в несколько групп [1]:

- условия эксплуатации (температура, наличие вибраций, условия хранения и транспортировки);
- свойства материалов фланцев (физико-механические, теплофизические, релаксационные);
- конструкция узла, в котором устанавливается фланцевое соединение (материал и масса деталей, геометрические размеры и форма);
- свойства герметизируемой среды (температура, давление, вязкость, химическая активность);
- технологические условия изготовления и сборки уплотнительного узла (точность изготовления, правильный порядок сборки, способ обработки рабочих поверхностей);
- соблюдение правил и условий эксплуатации (периодичность осмотров, соблюдение режимов эксплуатации).

Выбор материала для изготовления фланцев осуществляется в зависимости от рабочих температур эксплуатации соединения, диапазон которых довольно широк (от -150 до +1000 °C), а также от агрессивности герметизируемых технологических сред (например, моторное масло или растворы серной кислоты). В основном фланцы изготавливают из углеродистых, легированных и нержавеющей сталей марок: сталь 35, 40Х, 09Г2С, 15Х5М, 14Х17Н2, 20ХН3А, 25Х2М1Ф, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 06ХН28МДТ, чугуна, алюминиевых и титановых сплавов [2, 3].

Герметичность соединения достигается либо сближением поверхностей фланцев за счет контактного давления на их поверхности или заполнением всех микронеровностей и дефектов контактной поверхности фланцев материалом уплотнителя, который должен быть сжат некоторой силой, создающей в его поверхностных слоях напряжение, достаточное для его деформации до заполнения неровностей. Герметизирующая способность фланцевого соединения повышается, если следы обработки их рабочих поверхностей перпендикулярны потоку утечки и уменьшается при совпадении их направлений [4, 5]. Герметичность также может быть повышена за счет создания на рабочих поверхностях фланцев организованного (регулярного) микрорельефа, который создается поверхностно-пластическим

деформированием, например, вибрационным обкатыванием поверхностей контртел. Отклонение фактической поверхности фланцев от номинальной приводит к утечкам технологических сред через микро- и макроканалы. Риски, забоины, раковины и другие повреждения на поверхностях фланцев приводят к аналогичному результату. Вероятность их появления обратно пропорциональна качеству обработки сопряженной поверхности – чем грубее назначена обработка поверхности, тем меньший контроль осуществляется за ней [6, 7]. Кроме подобных дефектов большую роль играют загрязнения между поверхностями фланцев (волокна и стружки аналогичны крупным сквозным рискам). Очевидно, что наибольшая герметичность достигается при заполнении микронеровностей между поверхностями фланцев уплотнительным материалом, и чем он пластичнее, тем быстрее достигается полная герметизация соединения. В случае использования герметиков, заполнение микронеровностей происходит мгновенно, но максимальная герметичность достигается после полной полимеризации герметиков.

Однако, особый интерес представляет случай, когда уплотнительные элементы между поверхностями фланцев отсутствуют. Тогда, герметизация фланцевых соединений – это результат сближения микронеровностей и перекрытия сквозных каналов между рабочими поверхностями фланцев. Микроканалы образуются в результате шероховатости, а макроканалы – волнистости. При неполном сближении поверхностей фланцев часть микроканалов остаются сквозными, в результате чего происходит утечка технологических сред через них. Таким образом, чем больше величина шероховатости фланцев, тем большее необходимо создать контактное давление на их поверхности для полного перекрытия микроканалов. Высокое контактное давление в свою очередь ограничивает срок службы уплотнителя, так как выступы микронеровностей являются концентраторами напряжений, приводящими к усталостному разрушению уплотнителей при воздействии вибрационных нагрузок, циклически повторяющихся изменений перепадов давления герметизируемых сред и температуры окружающей среды. Следовательно, непосредственное влияние на герметизирующую способность фланцевых соединений оказывают шероховатость контактных поверхностей, направление следов механической обработки и контактное давление на поверхностях фланцев.

### Основная часть

Основное назначение фланцевых соединений – исключить взаимное проникновение через них герметизируемых сред. Герметизацию фланцевых соединений при отсутствии уплотнителя осуществляют за счет сближения поверхностей фланцев, которое происходит в три стадии. На первой стадии при незначительном контактном давлении происходит сближение до контакта самых больших выступов высотой, равной примерно  $R_z$ . При этом создается система впадин, образующих капилляры. Поперечные каналы, как правило, либо не являются заглушенными, либо соединяются со сквозными микроканалами. На второй стадии при увеличении контактного давления происходит заполнение регулярных микровпадин и основная герметизация фланцевого соединения в результате перекрытия микроканалов. Третья стадия характеризуется заполнением впадин-дефектов [8].

Как правило, утечка герметизируемых сред через микроканалы происходит в ламинарном режиме. Если выделить в объеме этой жидкости элемент со сторонами  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  и заменить действие на него остальной части жидкости реакциями связи – давлением  $p$  и касательным напряжением  $\tau$ , гравитационной, центробежной и других массовых сил, равнодействующая которых  $J$ , отнесенная к массе  $dM = \rho \delta_x \delta_y \delta_z$ , имеет размерность ускорения и обратное ему направление. При условии, что все переменные непрерывны, выразим равенство системой трех дифференциальных уравнений Навье – Стокса в проекциях на координатные оси, упрощенных исключением квадратичных членов инерции, ввиду ламинарного течения жидкости в микроканалах по близким к параллельным траекториям [9].

С учетом уравнения неразрывности, выражающего закон сохранения массы, и уравнения, устанавливающего зависимость между давлением  $p$ , плотностью  $\rho$  и вязкостью  $\mu$ , получим выражение [10, 11]:

$$\frac{dv_x}{dt} = j_x - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{d^2 v_x}{dx^2} + \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{d^2 v_x}{dz^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = j_y - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{d^2 v_y}{dx^2} + \frac{d^2 v_y}{dy^2} + \frac{d^2 v_y}{dz^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = j_z - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{d^2 v_z}{dx^2} + \frac{d^2 v_z}{dy^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} \right), \quad (3)$$

где  $j_x, j_y, j_z$  – составляющие ускорения массовых сил, действующих на выделенный элементарный объем жидкости;

$v_x, v_y, v_z$ , – составляющие скорости в направлении координатных осей  $x, y, z$ .

В случае, когда жидкость течет в одном направлении, имеем:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{dp}{dy} = 0; \quad (4)$$

$$v_x = v_z = 0; \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p_1 - p_2}{l}, \quad (6)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление рабочей и внешней сред во фланцевом соединении, Па;

$l$  – длина микроканала, м.

Если пренебречь массовыми силами, система уравнений 1...3 примет вид:

$$\frac{d^2 v_x}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – вязкость, Па·с.

Интегрируя полученное уравнение предположив, что утечка жидкости происходит под действием перепада давлений  $\Delta p$  получим выражение, характеризующее распределение скорости ее потока по микроканалу:

$$v_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\Delta p}{l} \left[ \left( \frac{\delta}{2} \right)^2 - y^2 \right], \quad (8)$$

где  $\delta$  – высота микроканала, м.

В общем случае утечка технологической среды,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, через фланцевое соединение рассчитывается по формуле [1]:

$$Q = \frac{P_2 - P_1}{\Delta t} V, \quad (9)$$

где  $P_2$  – давление внутри соединения в момент времени  $t_1 + \Delta t$ , Па;

$P_1$  – давление внутри соединения в момент времени  $t_1$ , Па;

$V$  – объем внутренней полости фланцевого соединения, м<sup>3</sup>.

Утечка технологической среды,  $Q_i$ , м<sup>3</sup>/с, через микроканал во фланцевом соединении за счет перепада давлений герметизируемой и внешней сред составит:

$$Q_i = \frac{B_i}{12l_i} \frac{\Delta p}{\mu} \delta_i^3, \quad (10)$$

где  $B_i, l_i$  и  $\delta_i$  – ширина, длина и высота  $i$ -го микроканала, м;

$\Delta p$  – перепад давлений, Па.

Механизм утечки через микроканалы определяется закономерностями ламинарного течения вязкой жидкости через макрозазоры. В неподвижных щелевых уплотнениях в соответствии с уравнением (10) расход пропорционален ширине и высоте микроканалов, а также перепаду давлений.

В реальных условиях работы фланцевые соединения подвергаются вибрационным и динамическим нагрузкам, а под влиянием давления и температуры происходит их деформация и изменение вязкости технологических сред, что значительно усложняет и делает громоздкими математические вычисления. Поэтому для практических расчетов целесообразно использовать уравнения, полученные путем введения в уравнение (10) безразмерного коэффициента формы  $\psi$ , зависящего от соотношения ширины микроканалов  $B_i$  к их длине  $l_i$ :

$$\psi = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n \eta_i \frac{B_i}{l_i} \delta_i^3, \quad (11)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий средние статистические зависимости параметров.

В этом случае выражение (10) примет вид:

$$Q_i = \psi \frac{B_i \Delta p}{\mu l_i} \delta_i^3. \quad (12)$$

Коэффициент формы характеризует проводимость микроканалов и зависит от состояния поверхности фланцев и контактного давления на их поверхности, направления следов обработки, свойств материала фланца. Он учитывает наличие микроканалов, образованных регулярными следами механической обработки  $\psi_p$  и совершенно случайных дефектов  $\psi_{сд}$  на поверхности – риск, раковин, частиц загрязнений и т.д.:

$$\psi = \psi_p + \psi_{сд}. \quad (13)$$

В работе [8] установлено, что:

$$\psi_p = \psi_0 e^{-3P_k/kE}, \quad (14)$$

где  $\psi_0$  и  $k$  – коэффициенты, характеризующие качество обработанной поверхности;  
 $E$  – модуль упругости контактирующих поверхностей фланцевого соединения, Па;  
 $P_k$  – контактное давление на поверхности фланцев, Па.

В ряде случаев размеры дефектов превышают размеры регулярных микронеровностей, поэтому для их заполнения уплотнителем необходимо большее контактное давление. При прочих равных условиях, частота появления дефектов прямо пропорциональна размерам контактной поверхности фланцев, а их влияние на герметичность обратно пропорционально ширине уплотнения.

В уравнение (12) подставим функцию формы  $\psi = \psi_0 e^{-3P_k/kE} + \psi_{сд}$ .

При  $P_k > kE$  получим выражение

$$\psi_{сд} = \frac{1}{12} \sum \frac{B_d}{B} \left( \frac{\delta_d}{R_z} \right), \quad (15)$$

где  $B_d$  и  $\delta_d$  – соответственно ширина и высота дефекта, м;  
 $B$  – средний шаг неровностей профиля по вершинам, м;  
 $R_z$  – шероховатость поверхности, м.

Подставив уравнения (14) и (15) в выражение (13), получим результирующее выражение для определения коэффициента формы:

$$\psi = \psi_0 e^{-3P_k/kE} + \frac{1}{12} \sum \frac{B_d}{B} \left( \frac{\delta_d}{R_z} \right). \quad (16)$$

Общая утечка,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, РЖ через фланцевое соединение составляет

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i, \quad (17)$$

где  $Q_i$  – утечка через сквозной микроканал, м<sup>3</sup>/с;  
 $m$  – количество микроканалов, шт.

Подставив выражение (12) в (17), получим уравнение для определения общей утечки технологической среды через фланцевое соединение при отсутствии между фланцами уплотнительного элемента:

$$Q = \psi \frac{B \Delta p}{\mu l} \delta^3. \quad (18)$$

Таким образом, нулевые утечки технологической среды через фланцевое соединение можно обеспечить минимизацией величины ширины и высоты микроканалов, перепада давлений герметизируемой и внешней сред за счет контактного давления на поверхности фланцев. Связь между величиной контактного давления и размерами микроканалов определяется из соотношений [1]:

$$\delta_i = R_z e^{-3P_k/kE}, \quad (19)$$

$$B_i \approx \left( l/k_1 \right) e^{-3P_k/kE}, \quad (20)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий средние статистические зависимости параметров.

Если учесть вышеописанные зависимости размеров микроканалов от контактного давления, то выражение (18) примет вид:

$$Q = \psi_0 \frac{B \Delta p}{\mu l} R_z^3 e^{-3P_k/kE}, \quad (21)$$

Из уравнения (21) следует, что при повышении контактного давления  $P_k$  до величины  $kE$  ( $k \approx 0,1 \dots 0,3$ ), утечки уменьшаются приблизительно на два порядка. Однако, из-за больших значений модуля упругости материалов фланцев ( $E = 70\,000 \dots 210\,000$  МПа) [11], для предотвращения утечек технологических сред следует обеспечивать значительные контактные давления на поверхности фланцев ( $P_k = 1000 \dots 6000$  МПа), что может привести к их деформации. Поэтому для полного предотвращения утечек технологических сред следует использовать промежуточные уплотнительные элементы с небольшим модулем упругости.

### Заключение

Герметичность фланцевых соединений при отсутствии уплотнителей обеспечивается минимизацией размеров микроканалов за счет создания высокого контактного давления на поверхности фланцев. Для полного предотвращения утечек рабочей среды следует использовать промежуточные уплотнительные элементы, величина модуля упругости которых значительно ниже аналогичного показателя у материала фланцев.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев, Г.В. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Г.В. Голубев, Л.М. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
2. Надежность технических систем. Курсовое проектирование / Е. А. Пучин, А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев [и др.]. – Орел : Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2012. – 96 с.
3. Надежность технических систем / Е.А. Пучин, Е.А. Лисунов, А.В. Чепурин, И.Н. Кравченко и др. – М.: Издательство КолосС, 2010. – 318 с.
4. Кононенко, А. С. Герметизация неподвижных фланцевых соединений анаэробными герметиками при ремонте сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кононенко Александр Сергеевич. – Москва, 2001. – 156 с.
5. Kononenko, A. S. Theoretical Determination of the Minimum Thickness of a Polymer Layer Providing Ensured Protection of a Shaft–Bearing Joint from Fretting Corrosion / A. S. Kononenko, A. A. Solovyeva, V. F. Komogortsev // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, No. 1. – P. 45-49.
6. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
7. Кононенко, А. С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кононенко Александр Сергеевич. – Москва, 2012. – 34 с.
8. Борисов, В. И. Условия функционирования системы "уплотнитель-контртело" и механизм утечек рабочей жидкости / В. И. Борисов, М. А. Березин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2017. – С. 83-89.
9. Современные конструкции деталей и узлов транспортных средств (уплотнения, муфты) / С. Л. Лебский, М. М. Матлин, А. В. Попов, И. М. Шандыбина ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2013. – 111 с.
10. Кожевникова, Н. Г. Механика жидкости и газа : Учебное пособие / Н. Г. Кожевникова, Н. А. Шевкун, А. В. Драный. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Мегаполис", 2021. – 161 с.
11. Огар, П. М. Контактное шероховатых поверхностей: фрактальный подход / П. М. Огар, Д. Б. Горохов. – Братск, 2007. – 171 с.

### Кононенко Александр Сергеевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры  
«Технологии обработки материалов»  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел.: 8 (926) 147-17-50  
E-mail: as-kononenko@yandex.ru

### Нотфуллин Ильдар Фаридович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
аспирант кафедры «Технологии обработки  
материалов»  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел.: 8 (919) 631-27-13  
E-mail: Ildarnot@mail.ru

KONONENKO A.S., NOTFULLIN I.F.

## THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE USE OF SEALING ELEMENTS TO ENSURE THE TIGHTNESS OF FLANGE CONNECTIONS

**Abstract.** *The influence of structural and technological parameters on the sealing ability of flange connections is considered. It is theoretically justified to ensure the tightness of flange connections in the absence of seals by creating high contact pressure on the surface of the flanges and using intermediate sealing elements with a small modulus of elasticity.*

**Keywords:** *Flange connection, tightness, flange, sealing ability, microchannel, process medium, sealer.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Golubev, G.V. Uplotneniya i uplotnitelnaya tekhnika: spravochnik [Seals and sealing equipment: reference] / G.V. Golubev, L.M. Kondakov. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 464 p.
2. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem. Kursovoe proektirovaniye [Reliability of technical systems. Course design] / E. A. Puchin, A. V. Kolomeychenko, V. N. Logachev [i dr.]. – Orel : Orlovskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni N.V. Parakhina, 2012. – 96 p.
3. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems] / E.A. Puchin, E.A. Lisunov, A.V. Chepurin, I.N. Kravchenko and others - M.: KolosS Publishing House, 2010. - 318 p.
4. Kononenko, A. S. Germetizatsiya nepodviznykh flancevykh soedineniy anaerobnymi germetikami pri remonte selskokhozyajstvennoy tekhniki : specialnost 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhnicheskogo obsluzhivaniya v selskom khozyajstve" [Sealing of fixed flange connections with anaerobic sealants in the repair of agricultural machinery : specialty 05.20.03 "Technologies and maintenance tools in agriculture"] : dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Kononenko Aleksandr Sergeevich. – Moskva, 2001. – 156 p.
5. Kononenko, A. S. Theoretical Determination of the Minimum Thickness of a Polymer Layer Providing Ensured Protection of a Shaft–Bearing Joint from Fretting Corrosion / A. S. Kononenko, A. A. Solovyeva, V. F. Komogortsev // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, No. 1. – P. 45-49.
6. Kondakov, L.A. Rabochie zhidkosti i uplotneniya gidravlicheskikh sistem [Working fluids and seals of hydraulic systems] / L.A. Kondakov. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 216 p.
7. Kononenko, A. S. Povysheniye nadezhnosti nepodviznykh flancevykh soedineniy selskokhozyajstvennoy tekhniki ispolzovaniem nanostrukturirovannykh germetikov : specialnost 05.20.03 "Tekhnologii i sredstva tekhnicheskogo obsluzhivaniya v selskom khozyajstve" [improving the reliability of fixed flange connections of agricultural machinery using nanostructured sealants : specialty 05.20.03 "Technologies and maintenance tools in agriculture"] : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Kononenko Aleksandr Sergeevich. – Moskva, 2012. – 34 p.
8. Borisov, V. I. Usloviya funkcionirovaniya sistemy "uplotnitel-kontrtelo" i mekhanizm utechek rabochey zhidkosti [Operating conditions of the "sealer-counterbody" system and the mechanism of leakage of the working fluid] / V. I. Borisov, M. A. Berezin // Ehnergoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy : MEZHVUZOVSKIY SBORNIK NAUCHNYKH TRUDOV. – Saransk : Nacionalnyy issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogaryova, 2017. – P. 83-89.
9. Sovremennyye konstruktsii detalej i uzlov transportnykh sredstv (uplotneniya, mufty) [Modern designs of vehicle parts and assemblies (seals, couplings)] / S. L. Lebskiy, M. M. Matlin, A. V. Popov, I. M. Shandybina ; Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet. – Volgograd : Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2013. – 111 p.
10. Kozhevnikova, N. G. Mekhanika zhidkosti i gaza : Uchebnoye posobie [Fluid Mechanics : A textbook] / N. G. Kozhevnikova, N. A. Shevkun, A. V. Dranyj. – Moskva : Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu "Megapolis", 2021. – 161 p.
11. Ogar, P. M. Kontaktirovaniye sherokhovatykh poverkhnostey: fraktalnyy podkhod [Contacting rough surfaces: a fractal approach] / P. M. Ogar, D. B. Gorokhov. – Bratsk, 2007. – 171 p.

#### Kononenko Alexander Sergeevich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
Doctor of Science, Docent, Professor of «Materials Processing Technologies» department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (926) 147-17-50  
E-mail: as-kononenko@yandex.ru

#### Notfullin Ildar Faridovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
Postgraduate student of «Materials Processing Technologies» department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (919) 631-27-13  
E-mail: Ildarnot@mail.ru

# ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 502.174:697.7

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-369-1-46-53

БУРКОВА Е.В., БУРКОВ Д.В., ОСАДЧАЯ Л.И., БУРКОВА С.Д.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕЛИОСТАНЦИЙ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОТРАБОТАННЫХ КАРЬЕРОВ

**Аннотация.** Разработана структурно – функциональная схема тепловой гелиостанции с полезной мощностью 25МВт с использованием сезонного аккумулятора на основе отработанного карьера. Приведены физическая и математические модели, устанавливающие связи внешних и внутренних факторов с окружающей средой. Что позволило оценить тепловые потери во всех компонентах структурной схемы и определить полезную площадь гелиостанции, а также ее эффективность для отопления и горячего водоснабжения.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, традиционные энергоносители, система солнечного теплоснабжения, каскадные гелиустановки, горячее водоснабжение.

### Введение

Создание гелиотепловой станции (ГТС) с учетом преобразования солнечной энергии в тепловую и сохранения ее в сезонном аккумуляторе рассматривается в работе [1,2]. Сохраненное тепло предлагается использовать в системе отопления и горячего водоснабжения (ГВС) жилищного фонда Балаклавского района г. Севастополя. Необходимая мощность тепловой энергии определялась из суммарной мощности котельных, которые обеспечивают отопление и (ГВС) в данном районе, что составляет 25 МВт.

### Основная часть

Для производства тепловой энергии и определения величины гелиополя необходимого для ее аккумулирования, сохранения в сезонном аккумуляторе, пополнение потерь в процессе передачи в тепловые пункты необходимо оценить потери во всех звеньях системы гелиостанции. Эти потери можно представить через коэффициенты сохранения теплоты в компонентах системы. С учетом известной установленной мощности котельных, обеспечивающих теплотой потребителей и известных коэффициентов сохранения теплоты, разработана тепловая схема гелиостанции [3]. Тепловая схема ГТС представляет собой упрощенную графическую часть ее составляющих компонентов. Она позволяет предварительно оценить тепловые потоки во всех ее звеньях. Расчетные тепловые потоки и их температурные уровни, которые вначале генерируются в гелиополе, а затем аккумулируются в сезонном аккумуляторе и передаются в конечном итоге к потребителю, отражаются на осях X (Q) и Y (T) (см. рисунок 1,2).

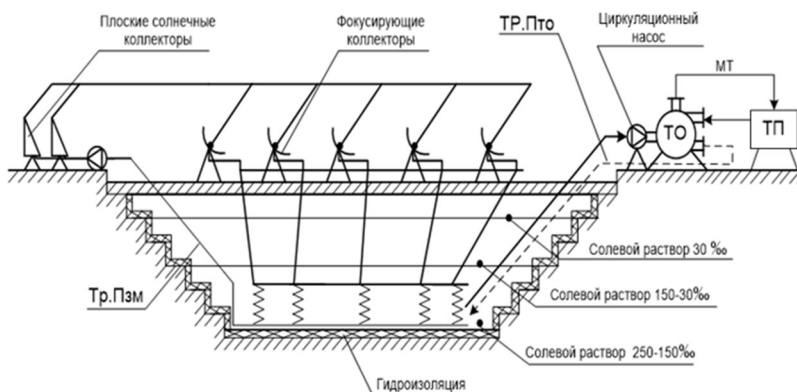


Рисунок 1 – Схема поперечного разреза сезонного аккумулятора солнечной энергии

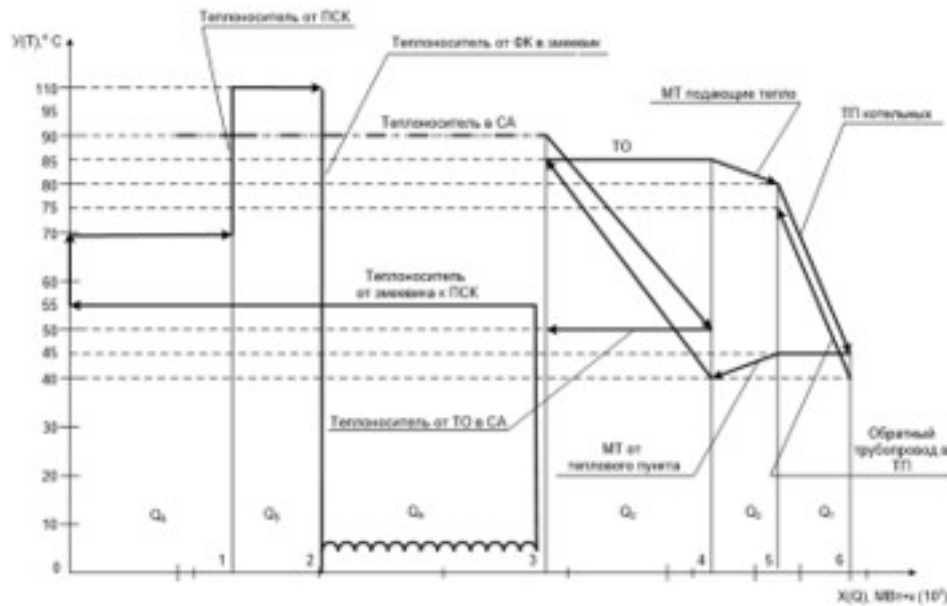


Рисунок 2 – Параметры компонентов геостанции:

ПСК – плоский солнечный коллектор; СА – сезонный аккумулятор; МТ – магистральные трубопроводы; ТП – тепловой пункт; ФК – фокусирующий коллектор; 0-1 – система подогрева теплоносителя в ПСК; 1-2 – система подогрева теплоносителя в ФК; 2-3 – система передачи тепла аккумуляющей жидкости через змеевик модульной установки; 3-4 – передача теплоты от системы аккумуляции в теплообменник (ТО); 4-5 – перенос теплоносителя в магистральные трубопроводах к теплому пункту; 5-6 – подогрев рабочей среды в теплообменниках теплового пункта. Тр. Пто – трубопровод, подающий теплоноситель от сезонного аккумулятора в ТО; Тр.Пзм – трубопровод, подающий теплоноситель от геостанции к змеевиковому теплообменнику

## Расчет

Численные значения координаты Q вычислены по формулам, приведенным ниже. Для теплового пункта (ТП), количество необходимой тепловой энергии [4] ( $Q_1$ , см. рисунок 1,2) можно выразить уравнением:

$$Q_1 = Q_{TP} = (N_{OT} \cdot n_{OT} \cdot \tau_{OT} + N_{ГВС} \cdot n_{ГВС} \cdot \tau_{ГВС}) / \eta_{TP} \quad (1)$$

где  $N_{OT}$  и  $N_{ГВС}$  – установленная мощность системами отопления и горячего водоснабжения в отапливаемый и не отапливаемый периоды в течение года соответственно, МВт;

$\eta_{TP}$  – коэффициент сохранения теплоты теплового пункта,  $\eta_{TP} = 0,92$  (принимается по опыту эксплуатации);

$n_{OT}$  и  $n_{ГВС}$  – количество отапливаемых суток и количество суток подачи воды на ГВС в году соответственно;

$\tau_{OT}$  и  $\tau_{ГВС}$  – время работы систем в течение суток.

Коэффициент сохранения теплоты компонента системы – количественное отношение полезной используемой теплоты к количеству подведенной теплоты компоненту системы, т.е. в общем случае

$$\eta = \frac{Q_{п.и.}}{Q_{п.к.}} \quad (2)$$

Количество необходимой теплоты от теплообменника (ТО,  $Q_2$ ) по магистральным трубопроводам к ТП с учетом коэффициента сохранения теплоты в магистральных трубопроводах

$$Q_2 = Q_{MT} = Q_{TP} / \eta_{MT} \quad (3)$$

Количество трансформируемой теплоты ( $Q_3$ ) в теплообменнике, поступающей от сезонного аккумулятора с учетом сохранения теплоты в теплообменнике ( $\eta_{то}$ ) и в падающем трубопроводе ( $\eta_{тр.п.то}$ )

$$Q_3 = Q_{TO} = Q_{TP} / \eta_{то} \cdot \eta_{тр.п.то} \quad (4)$$

Количество аккумулированной теплоты ( $Q_4$ ) в сезонном аккумуляторе с учетом коэффициента сохранения теплоты

$$Q_4 = Q_{ак} = Q_{ТО}/\eta_{ак} \quad (5)$$

где  $\eta_{мт}=0,99$ ,  $\eta_{то}=0,99$ ,  $\eta_{тр.п.то}=0,997$  – коэффициенты сохранения теплоты компонентов гелиостанции соответственно: магистральных трубопроводов, теплообменника, подъемных трубопроводов к ТО, которые приняты по выполненным предварительным оценкам.

Величина гелиополя будет определяться уравнением:

$$A = \frac{Q_u}{\eta \cdot \sum_{n=1}^7 I} \quad (6)$$

где  $I$  суммарный уровень радиации за 7 месяцев (апрель - октябрь),

$\eta$  – сезонный коэффициент полезного действия гелиосистемы.

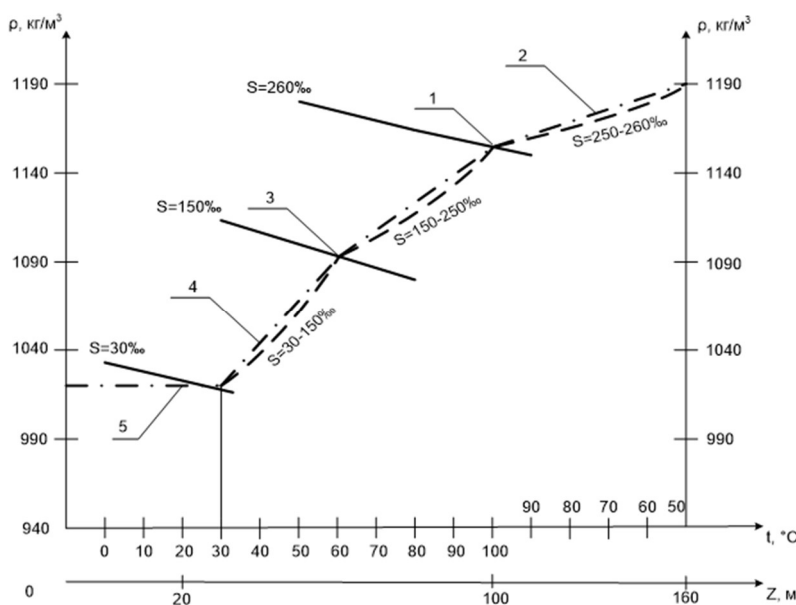
Коэффициент сохранения теплоты аккумулятора определяется из условия:

$$\eta_{ак} = 1 - \frac{Q_{пот}}{Q_3} \quad (7)$$

где  $Q_{пот}$  – суммарные потери теплоты в окружающую среду по сезонам (лето, осень, зима, весна).

Аккумулирующий материал представляет собой солевой раствор, состоящий из трех слоев: верхний слой имеет соленость 30 ‰\*, в среднем слое соленость изменяется от 30 до 150 ‰ и нижний слой представляет собой перенасыщенный солевой раствор с соленостью от 150 до 260 ‰. Во всех слоях за счет разности солености и температур будет происходить изменение плотности по высоте слоя, в результате чего будет подавляться естественная конвекция (см. рисунок 3). Условно принимаем, что температура и концентрация верхнего слоя солевого раствора не изменяется.

\* ‰ – обозначение промилля. Величина 1‰ солевого раствора составляет 1 г соли на 1 литр воды.



**Рисунок 3 – График изменения плотности ( $\rho$ ) и концентрации ( $S$ ) солевого раствора от температуры и от глубины солевого раствора в карьере,  $Z$ :**

1 – плотность на границе раздела фаз нижнего и среднего слоев, при температуре  $t = 100^\circ\text{C}$  и  $Z = 100\text{м}$ ; 2 – изменение плотности нижнего слоя при температуре  $t$  от  $100^\circ\text{C}$  до  $50^\circ\text{C}$  и  $Z$  от  $100\text{м}$  до  $160\text{м}$ ; 3 – плотность на границе раздела фаз при  $t = 60^\circ\text{C}$  и  $Z = 60\text{м}$ ; 4 – изменение плотности слоя, находящегося на глубине от  $Z = 20$  до  $60\text{м}$ ; 5 – плотность не изменяется,  $\rho_{20} = \text{const}$

Потеря теплоты в нижнем слое будет осуществляться за счет термического сопротивления ограждающей конструкции (стенок) аккумулятора. Если принять на

поверхности границы раздела фаз нижнего и среднего слоев температуру  $100^{\circ}\text{C}$ , то потеря теплоты от нижней границы раздела фаз до средней и далее до верхней изоляции будет происходить за счет теплопроводности через «ограждающую» конструкцию и дополнительно за счет теплопроводности слоев солевого раствора с различным уровнем концентрации и далее через верхнюю изоляцию, которая соприкасается с окружающей средой. Высота нижнего слоя определяется из условия обеспечения необходимого объема аккумулирующей теплоты  $Q_4$ .

Для составления математического описания потерь сезонного аккумулятора рассмотрим его физическую модель (рисунок 4). В этой модели ось  $Z$  направлена вниз от подстилающей поверхности карьера. Температура в аккумуляторе изменяется по оси  $Z$  положительно (см. штрихпунктирную линию) и зависит от теплопроводности стенок карьера и солёности слоев фаз и их высот.

В рассматриваемой модели солёность слоев изменяется близко к линейному закону. Температура будет меняться так же по линейному закону. Она связана с термическим сопротивлением слоев фаз, в пределах которых принимается  $S=\text{const}$ , которая для расчета принимается полусумме концентрации на границах каждой из фаз. Для верхнего слоя  $S=\text{const}$  и равна концентрации 30‰ для условий Черного моря (Балаклавская бухта).

Соответственно из этих условий принимается коэффициент теплопроводности в рамках фазы  $\lambda=\text{const}$  соответствующие принятой солёности в растворах (см. рисунок 5). В нижнем слое солевого раствора изменение температуры по его высоте происходит за счет изменения температуры в змеевиковом теплообменнике.

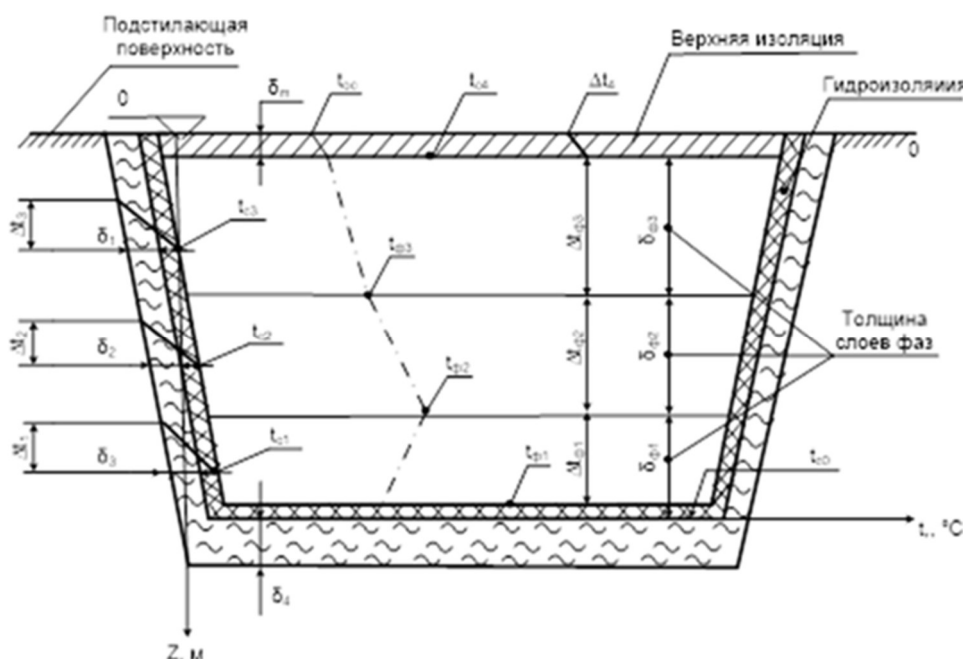


Рисунок 4 – Схема физической модели сезонного аккумулятора на основе выработанного карьера

В рассматриваемой модели сделаны следующие допущения:  $t_{с1}=t_{ж1}$ ;  $t_{с2}=t_{ж2}$ ;  $t_{с3}=t_{с4}=t_{ж3}$ ; толщина гидроизоляционного слоя на предварительном этапе принимается  $\delta_{г.и}=0,5$  м; толщины слоев естественной изоляции по уровням карьера приняты:  $\delta_1$ ;  $\delta_2$ ;  $\delta_3$ ; и соответственно для каждой толщины изоляции эквивалентные коэффициенты теплопроводности, т.е. для  $\delta_1$  -  $\lambda_{э1}$ ,  $\delta_2$  -  $\lambda_{э2}$ ,  $\delta_3$  -  $\lambda_{э3}$ , толщина покрытия верхней изоляции  $\delta_m$ ; для  $\delta_m$  -  $\lambda_{мэ}$ .

Толщины слоев жидкости  $\delta_{ф1}$ ,  $\delta_{ф2}$ ,  $\delta_{ф3}$  на предварительном этапе принимаются из условия изменения концентрации солёности.

$\delta_{ф1}$  – соответствует средней солёности  $S=200$  ‰;

$\delta_{ф2}$  - соответствует средней солёности  $S=90$  ‰;

$\delta_{ф3}$  - соответствует средней солёности  $S=30$  ‰.

Таким образом, принимается, что фаза внутри заданного слоя однородна.

Задача определения потерь теплоты сводится к определению суммы удельных тепловых потоков, проходящих через ограждающую конструкцию аккумулятора и в направлении оси Z (рисунок 4). При этом принимается, что передача тепла осуществляется при граничных условиях первого рода [3]:  $t_c = \text{const}$ ;  $t = t_{\phi 1} = \text{const}$ ;  $t = t_{\phi 2} = \text{const}$ ;  $t = t_{\phi 3} = \text{const}$ ;  $t = t_{\phi 4} = \text{const}$ ;  $t = t_{oc}$  – усредненная температура воздуха по сезонам. При оценках уровня падения температур на каждом слое должны учитываться изменения коэффициентов теплопроводности солевого раствора  $\lambda$  [5,6] (см. рисунок 5).

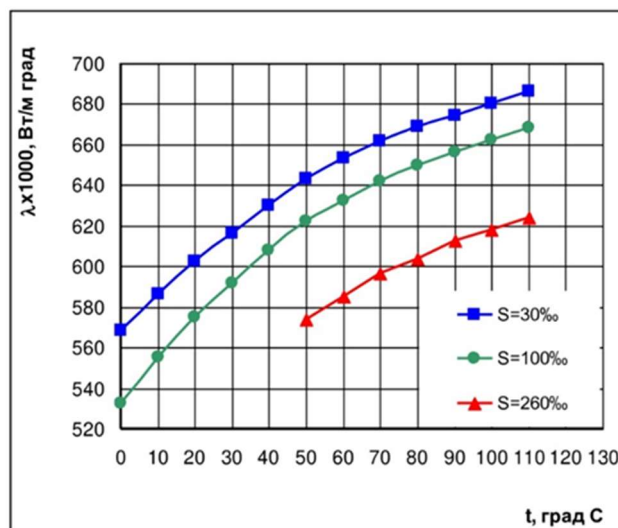


Рисунок 5 – График зависимости теплопроводности солевого раствора от температуры и концентрации соли

Рассмотрим первоначально уравнение теплового баланса сезонного аккумулятора [8,9]

$$(Q_{AK}^{\Delta\tau OT} + Q_{AK}^{\Delta\tau}) - (Q_{CIS}^{\Delta\tau} + Q_{POT}^{\Delta\tau}) = 0 \quad (8)$$

где  $Q_{AK}^{\Delta\tau OT}$  – количество аккумулированной солнечной энергии в отапливаемый период; МДж;

$Q_{AK}^{\Delta\tau}$  – количество аккумулированной солнечной энергии в течение не отапливаемого периода, МДж;

$Q_{CIS}^{\Delta\tau}$  – общее количество необходимой теплоты для передачи ее в тепловой пункт за отопительный и неотапливаемый периоды, МДж;

$Q_{POT}^{\Delta\tau}$  – количество тепловых потерь в окружающую среду в сезонном аккумуляторе, в течение года, МДж.

Если обозначить:  $Q_{AK}^{\Delta\tau OT} + Q_{AK}^{\Delta\tau} = Q_{TP}$ , где  $Q_{TP}$  – общее количество аккумулированной солнечной энергии в аккумуляторе, тогда уравнение (7) примет вид:

$$Q_{TP} = Q_{CIS}^{\Delta\tau} + Q_{POT}^{\Delta\tau} \quad (9)$$

$Q_{CIS}^{\Delta\tau}$  системы определяется по выражению:

$$Q_{CIS}^{\Delta\tau} = Q_{TI} + Q_{MT} + Q_{TO} \quad (10)$$

Компоненты потерь  $Q_{CIS}^{\Delta\tau}$  выражены через коэффициенты сохранения теплоты (см. уравнения 2-5).

$Q_{POT}^{\Delta\tau}$  можно оценить:

$$Q_{POT}^{\Delta\tau} = 10^{-6} \cdot \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\lambda_{i2}}{\delta_i} \cdot \Delta t_i \cdot F_i \right) + \sum_{\phi=1}^3 \left( \frac{\lambda_{\phi}}{\delta_{\phi}} \cdot \Delta t_{\phi} \cdot F_{\phi} \right) + \left( \frac{\lambda_{m2}}{\delta_m} \cdot F_m \cdot \sum_{k=1}^4 \Delta t_{mk} + \sum_{k=1}^4 (F_m \cdot \alpha_k \cdot \Delta t_k) \right) \right] \cdot \sum_{k=1}^4 \tau_k, \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (11)$$

где  $\lambda_{i2}$ ;  $\lambda_{\phi 2}$ ;  $\lambda_{m2}$  – эквивалентные коэффициенты теплопроводности соответственно стенок карьера, соляного раствора, фаз и верхней изоляции, Вт/м·К:

- 1)  $\delta_i$  – принимается (по конструктивным соображениям) толщина стенок карьера по его высоте, м;
  - 2)  $\delta\phi$  – принимаемая толщина слоев фаз по высоте карьера, м;
  - 3)  $\delta m$  – толщина слоев материала верхней изоляции, м;
- $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки верхней изоляции к воздуху, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $F_i; F_\phi; F_m$  – поверхность карьера омываемая аккумулярующей средой; поверхность фаз, поверхность верхней изоляции, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta t_i$  – перепад температур стенки на каждом i–ом уровне слоя, °С;  
 $\Delta t_\phi$  – перепад температур на слое каждой фазы, °С;  
 $\Delta t_m$  – перепад температур на каждом слое изоляции, °С;  
 $\Delta t_k$  – температурный перепад между температурой наружной поверхности верхней изоляции и окружающим воздухом, °С;  
 $\tau_k$  – время работы аккумулятора по сезонам, ч.

Индекс  $k$  указывает на календарное время работы аккумулятора в принятом сезоне. Температура воздуха и уровень радиации изменяются по сезонам, что будет сказываться на величине потерь в аккумуляторе [9,10]. В связи с этим сезоны нами приняты из метеорологических условий для Севастополя. Для предварительной оценки тепловых потерь, используя уравнения (10), принимаем:

$k=1$  (апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь);  $\alpha_k=7,8$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta t_k=0$ ;  $\tau_k=5136$  ч.

$k=2$  (ноябрь, до 15 декабря);  $\alpha_k=8,0$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta t_k=5$ ;  $\tau_k=1080$  ч.

$k=3$  (с 15 декабря, январь);  $\alpha_k=12,0$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta t_k=18$ ;  $\tau_k=1128$  ч.

$k=4$  (февраль, март);  $\alpha_k=10,0$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta t_k=8$ ;  $\tau_k=1416$  ч.

Остальные исходные параметры, входящие в уравнение (11) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные параметры для оценки тепловых потерь

Параметры	$F_{i=1}=F_{i=3},$ $м^2$	$F_{i=2},$ $м^2$	$F_{\phi=1}=F_{\phi=2}=F_{\phi=3},$ $м^2$		$F_m,$ $м^2$	$\lambda_{\phi i=1},$ Вт/м·К	$\lambda_{\phi i=2},$ Вт/м·К	$\lambda_{\phi i=3},$ Вт/м·К	$\lambda_{\phi=1},$ Вт/м·К	$\lambda_{\phi=2},$ Вт/м·К	
Численные значения	126000	26000	100000		80000	0,19	0,17	0,2	0,58	0,6	
Численные значения	0,62	0,1	3		0		20	20	2		
Численные значения	0,5	0,8	1	60	40	60	1	60	75	65	30

Подставив в уравнение (10) значения исходных параметров из таблицы 1 получим, что

$$Q_{\text{пот}}^{\Delta\tau} = 3,356 \cdot 10^4, \text{ МВт} \cdot \text{ч.} \quad (12)$$

Используя уравнения (1-4) получим

$$Q_1 = 87 \cdot 10^3, \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (13)$$

$$Q_2 = 88,8 \cdot 10^3, \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (14)$$

$$Q_3 = 89,7 \cdot 10^3, \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (15)$$

На основании уравнения (9) получим, что коэффициент сохранения теплоты:

$$\eta_{ak} = 1 - \frac{Q_{\text{пот}}^{\Delta\tau}}{Q_3} \quad (16)$$

$$\eta_{ak} = 1 - \frac{3,356 \cdot 10^4}{14,6 \cdot 10^4} = 0,77$$

Тогда по уравнению (7):

$$Q_4 = \frac{Q_3}{\eta_{ак}} \quad (17)$$

$$Q_4 = \frac{89,7 \cdot 10^3}{0,77} = 116,5 \cdot 10^3, \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Полученные данные наносятся в масштабе на рисунок 2.

По уравнению (6) получим величину гелиополя:

$$A = \frac{116,5 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 1,1} = 211,8 \cdot 10^3, \text{ м}^2$$

### Заключение

1. Приведенные физическая и математические модели, устанавливающие связи внешних и внутренних факторов с окружающей средой позволили оценить тепловые потери во всех компонентах структурной схемы и определить полезную площадь гелиостанции, а также ее эффективность для отопления и горячего водоснабжения.

2. Предложенная тепловая схема расчета ГТС может быть использована для гелиостанций, строящихся на основе выработанных или искусственно созданных карьерах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буркова Е.В., Бурков Д.В. Создание тепловой аккумулирующей гелиостанции с использованием отработанных карьеров / Е.В. Буркова, Д.В. Бурков // International Scientific and Practical Conference "Priority Directions of Complex Socio-Economic Development of the Region" (PDSED 2023).
2. Буркова Е.В., Горбатов О.И., Бурков Д.В. Основные принципы создания каскадных гелиоустановок для сезонного горячего водоснабжения / Е.В. Буркова, О.И. Горбатов, Д.В. Бурков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2021. – № 6 (350). – С. 167-171.
3. Буркова Е. В. Использование солнечной энергии для теплоснабжения для объектов индивидуального жилищного строительства / Е. В. Буркова, Д. В. Бурков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2022. – № 4 (354). – С. 101-108.
4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Мукомел А. С. Теплопередача // Энергоиздат М.: 1981.- С. 417
5. Алексеев П. М. Теплофизические параметры морской воды и ее концентратов // Л.: 1976.- С. 34.
6. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, А. Бекман; под ред. Вишнякова В. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
7. Аvezов Р.Р. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения / Р.Р. Аvezов, А. Ю. Орлов. – Ташкент. – 1988г.- 288с.
8. Полунин М. М. Гелиотопливная система горячего водоснабжения повышенной эффективности / М. М. Полунин, В. Д. Петра, А.Ф. Скребнев // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 4. – С. 20-23.
9. Гершкович В. Солнечные установки горячего водоснабжения / В. Гершкович // Возобновляемая энергетика. – 2008. – №1. – С. 11 – 24.
10. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод), издание 3-е, Изд-во: НПО ЦКТИ-ВТИ, Санкт-Петербург, 1998 - 257 с.

#### Буркова Елена Викторовна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техногенная безопасность и метрология»  
299011, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14  
Тел. +79787672889  
E-mail: lena1b@mail.ru

#### Бурков Дмитрий Валериевич

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Энергоустановки морских судов и сооружений»  
299011, г. Севастополь, Ул. Гоголя, 14  
Тел. +79787672881  
E-mail: dv.burkov@mail.ru

#### Осадчая Лилия Ивановна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь  
Кандидат географических наук, доцент кафедры  
«Техногенная безопасность и метрология»  
299011, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14  
Тел. +79780113408  
E-mail: liosadchaya@mail.sevsu.ru

#### Буркова Снежана Дмитриевна

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь  
Студент группы ТП/6-22-1-о  
Политехнический институт  
299011, г. Севастополь, ул. Гоголя, 14  
Тел. +79787672891  
E-mail: snezanaburkova460@gmail.com

BURKOVA E.V., BURKOV D.V., OSADCHAYA L.I., BURKOVA S.D.

## EFFICIENCY OF SOLAR PLANTS FOR HEATING AND HOT WATER SUPPLY BASED ON DECOMPOSED QUARRY PILES

**Abstract.** *A structural and functional diagram of a thermal solar power plant with a useful capacity of 25 MW using a seasonal accumulator based on a decommissioned quarry has been developed. Physical and mathematical models establishing the relationships between external and internal factors and the environment are provided. This made it possible to estimate heat losses in all components of the structural diagram and determine the useful area of the solar power plant, as well as its efficiency for heating and hot water supply.*

**Keywords:** *solar energy, traditional energy sources, solar heating system, cascade solar power plants, hot water supply.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Burkova E.V., Burkov D.V. Creation of a thermal accumulating solar station using spent quarries / E.V. Burkova, D.V. Burkov // International Scientific and Practical Conference "Priority Trends of Complex Socio-Economic Development of the Region" (PDSED 2023).
2. Burkova E.V., Gorbatykh O.I., Burkov D.V. Basic principles of creating cascade solar installations for seasonal hot water supply / E.V. Burkova, O.I. Gorbatykh, D.V. Burkov // Fundamental and applied problems of engineering and technology – 2021. – № 6 (350). – Pp. 167-171.
3. Burkova E. V. The use of solar energy for heat supply for individual housing construction facilities / E. V. Burkova, D. V. Burkov // Fundamental and applied problems of engineering and technology – 2022. – № 4 (354). – Pp. 101-108.
4. Isachenko V. P., Osipova V. A., Mukomel A. S. Heat transfer // Energoizdat M.: 1981. - p. 417
5. Alekseev P. M. Thermophysical parameters of seawater and its concentrates // L.: 1976.- p. 34.
6. Duffy J.A. Thermal processes using solar energy / J.A.Duffy, A.Beckman; ed. Vishnyakova V. – M.: Mir, 1977. – 420 p.
7. Avezov R.R. Solar heating and hot water supply systems / R.R. Avezov, A. Y. Orlov. – Tashkent. – 1988. - 288s.
8. Polunin M. M. Solar fuel hot water supply system of increased efficiency / M. M. Polunin, V. D. Petra, A.F. Skrebnev // Environmental technologies and resource conservation. – 2002. – No. 4. – pp. 20-23.
9. Gershkovich V. Solar installations of hot water supply / V. Gershkovich // Renewable energy. - 2008. – No.1. – pp. 11-24.
10. Thermal calculation of boilers (Normative method), 3rd edition, Ed.: NGO CCTI-VTI, St. Petersburg, 1998 - 257 p.

#### **Burkova Elena Viktorovna**

Federal State Educational Institution of Higher Education  
Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D., associate professor of the Department  
«Technogenic safety and metrology»  
14 Gogol str., Sevastopol, 299011  
Тел. +79787672889  
E-mail: lena1b@mail.ru

#### **Osadchaya Liliya Ivanovna**

Federal State Educational Institution of Higher Education  
Sevastopol State University, Sevastopol  
Candidate of Geographical Sciences  
Associate Professor of the Department of Technogenic  
Safety and Metrology  
14 Gogol str., Sevastopol, 299011  
Тел. +79780113408  
E-mail: liosadchaya@mail.sevsu.ru

#### **Burkov Dmitiy Valerievich**

Federal State Educational Institution of Higher Education  
Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D., associate professor of the Department  
«Power plants of ships and structures»  
14 Gogol str., Sevastopol, 299011  
Тел. +79787672881  
E-mail: dv.burkov@mail.ru

#### **Burkova Snezhana Dmitrievna**

Federal State Educational Institution of Higher Education  
Sevastopol State University, Sevastopol  
Student of group TP/b-22-1-o  
Polytechnic Institute  
14 Gogol str., Sevastopol, 299011  
Тел. +79787672891  
E-mail: snezanaburkova460@gmail.com

ЖИДКОВ А.В., ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., ДЕНИСОВ Д.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСА ГОЛОВНОГО МОЗГА

**Аннотация.** Предложена модель импеданса головы человека для исследования биофизических процессов методом импедансной электроплетизмографии. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований импеданса тканей при частоте переменного электрического тока 100 кГц. Описаны методика проведения эксперимента, используемое оборудование и полученные значения импеданса передних отделов головы. Проведённый статистический анализ подтверждает адекватность предложенной модели для оценки изменения импеданса структур головы.

**Ключевые слова:** импеданс биологических тканей, мозговое кровообращение, импедансная электроплетизмография, переменный ток, моделирование импеданса мозга, кровоток в сосудах головного мозга, электрическое сопротивление мозговых тканей, мониторинг кровенаполнения мозга.

### Введение

Заболевания, связанные с нарушениями кровообращения и с патологиями нервной системы по-прежнему занимают существенное место среди общего числа заболеваний. Так, например, по данным за 2022 год в России заболевания первой группы (артериальная гипертензия, атеросклероз сосудов головного мозга, инсульты, нарушения венозного оттока и т.п.) составляли 15,3 %, а заболевания второй группы (вегетососудистая дистония и травмы головы и т.п., которые тесно связаны с изменениями в кровообращении мозга) 10,4 % [1]. Очевидно, что несвоевременное обнаружение подобных нарушений и отсутствие правильной терапии может привести к опасным последствиям. В этой связи необходимость проведения комплексного подхода к диагностике не вызывает сомнения. А с учетом того, что проявление заболеваний может быть нестационарными и состояние пациента может варьироваться от улучшения до значительного ухудшения, актуальным становится наряду с диагностикой проведение мониторинга параметров, связанных с заболеванием. При этом актуальной задачей является разработка методов с технических средств, обеспечивающих возможность их персонализированного использования.

Рассмотренные авторами существующие методы диагностики и мониторинга кровенаполнения тканей и сосудов в [2] демонстрируют ряд их недостатков, связанных, прежде всего, со сложностью и дороговизной, а также с потребностью высокой квалификации применяющего их персонала, что неприемлемо для персонализированного использования. В этой связи предлагается проанализировать возможность применения для оценки динамики кровообращения и состояния сосудов головного мозга в будущих персонализированных устройствах метода электроплетизмографии, основанного на измерении электрического сопротивления (импеданса) различных биологических тканей при прохождении через них переменного тока и позволяющего, как показали ранее проведенные исследования [2], объективно оценивать кровенаполнение тканей.

Следует отметить, что эффективность применения электроплетизмографического метода также связана с различными факторами получения информации. Это расстояние между электродами, их геометрические параметры, места наложения, параметры частоты тока и его амплитуда и т.п. В этой связи для подтверждения возможности и эффективности этого метода при решении поставленных выше задач, для обоснования выбора наиболее приемлемых режимов и условий диагностирования, параметров воздействующего тока и разрабатываемых персонализированных медицинских устройств с целью получения максимально полезной информации о состоянии объекта, обеспечивающей принятие правильных врачебных решений, необходимы соответствующие теоретические исследования. Обязательным условием проведения таких исследований является наличие модели, адекватно описывающей объект и обеспечивающей возможность изучения влияния различных параметров процессов и явлений, происходящих в объекте, режимов и параметров диагностической аппаратуры на значение диагностического параметра, в данном случае, на

измеренное значение импеданса.

В рамках данной статьи приложены результаты исследования импеданса головного мозга, выполненные с целью проверки адекватности трёхмерной модели сложной структуры головы человека реальным физиологическим процессам, происходящим при прохождении переменного электрического тока частотой 100 кГц через биологические ткани объекта.

#### Априорные данные для моделирования

Исследование импеданса тканей основывается на методе импедансной электроплетизмографии, который позволяет оценивать импеданс различных биологических тканей при прохождении через них переменного тока.

Объектом исследования является импеданс головы, включающей в себя кожу, подкожный жир, череп, ликвор, серое и белое вещества головного мозга и Виллизиев круг, в котором находятся артерии, играющие ключевую роль в обеспечении кровоснабжения головного мозга. Данные о толщинах слоев и объёмах структур мозга, входящих в область исследования, представлены в таблице 1 [3, 4].

Таблица 1 – Толщины слоев и объёмы структур объекта исследований

Слои и структуры головы, входящие в область исследования	Значение
Кожа (толщина), мм	$2 \pm 1$
Подкожный жир (толщина), мм	$2 \pm 2$
Объём черепа, см <sup>3</sup>	1219,9
Объём ликвора, см <sup>3</sup>	151
Объём серого вещества, см <sup>3</sup>	731,11
Объём белого вещества, см <sup>3</sup>	550,99

Моделирование проводилось в программной среде Comsol Multiphysics с помощью модуля AC/DC, позволяющего моделировать электрические поля и токи в средах за счет применения уравнения Максвелла (уравнения электромагнитного поля) [5].

Исследование проводилось на частоте 100 кГц, исходя из принципов проведения РЭГ и встроенных параметров, реализованных в приборе медицинского назначения Рео-Спектр, наличия исследованных электропроводных свойств всех структур головы. Амплитуда переменного тока составляла 0,78 мА, материал электродов – сталь с высокой магнитной проницаемостью [5]. В качестве области исследования выступала голова (передние ее отделы), представленная также трёхмерной моделью в программной среде Comsol. Модель имеет анатомические слои, которым присвоены параметры в соответствии с их физико-электрическими характеристиками. Трёхмерная модель представлена на рисунке 1.

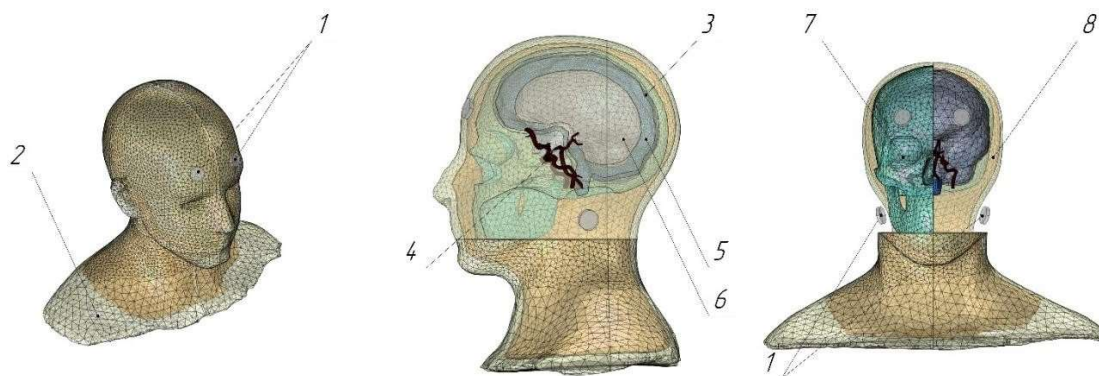


Рисунок 1 – Трёхмерная модель головы человека:

1 – электроды, 2 – кожа, 3 – ликвор, 4 – Виллизиев круг, 5 – серое вещество, 6 – белое вещество, 7 – череп, 8 – подкожный слой

В качестве материалов в модели учитывались следующие биологические ткани: кожа (эпидерма и дерма), кость, кровь, серое вещество мозга, белое вещество мозга. Физико-электрические характеристики биологических тканей для частоты 100 кГц приведены в таблице 2 [6, 7].

Таблица 2 – Физические параметры исследуемых слоёв для переменного тока частотой 100 кГц

Анатомический слой	Удельная электрическая проводимость, См/м	Диэлектрическая проницаемость
Кожа	0,075	20000
Подкожный жир	0,02	90
Кровь	0,61	3300
Кость	0,0144	280
Ликвор	2	100
Белое вещество	0,13	2500
Серое вещество	0,17	3800

В процессе моделирования были приняты некоторые допущения и упрощения:

- 1) модель головы приближена к реальному виду, ткани имеют изотропные свойства;
- 2) толщина слоев неоднородна в связи со сложной геометрией и в локальных участках может варьироваться;
- 3) при моделировании Виллизиев круга не учитываются стенки артерии, диаметр сосудов неоднороден и находится в пределах 6 – 8 мм в разных участках;
- 4) в связи со сложными геометрическими формами белое и серое вещество мозга представляет собой сплошную структуру в отличие от реальной анатомической разветвленности.

#### Методика проведения исследования

Для проведения исследований применялось оборудование научно-образовательного центра «Инновационные технические решения в области медицины» на базе Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева. В частности, использовался прибор Рео-Спектр-2, осуществляющий измерение импеданса исследуемого участка за счет воздействия переменного тока. Исследования проводились при следующих режимах и характеристиках:

- частота дискретизации 500 Гц;
- частота переменного тока 100 кГц
- сила тока 0,77 мА;
- диаметр электродов: 20 мм;
- биполярное отведение для измерения сигнала.

На рисунках 2, 3 представлены электроды и их крепление на теле человека.

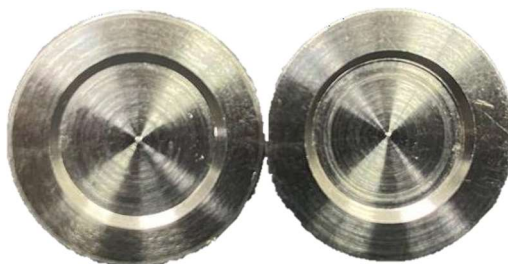


Рисунок 2 – Электроды для проведения исследования



Рисунок 3 – Крепление электродов (электроды скрыты за лентой)

Методика проведения исследования заключалась в следующем.

1. Объектом исследования являлась голова человека.
2. Измерение импеданса проводилось согласно методике измерения реоэнцефалографии (рисунок 3) [8], для которой применялись электроды диаметром 20 мм (рисунок 2), входящие в комплектацию прибора Рео-Спектр.
3. В программе Рео-Спектр оценивался базовый измеренный импеданс, полученный через градуировочную таблицу сопротивления, снятую на Рео-Спектре с помощью магазина сопротивлений Р33.
4. Электроды крепились на голову человека (рисунок 3), затем в программе запускалась запись диаграмм, в которой отображались значения импеданса и реограмм (рисунок 4).

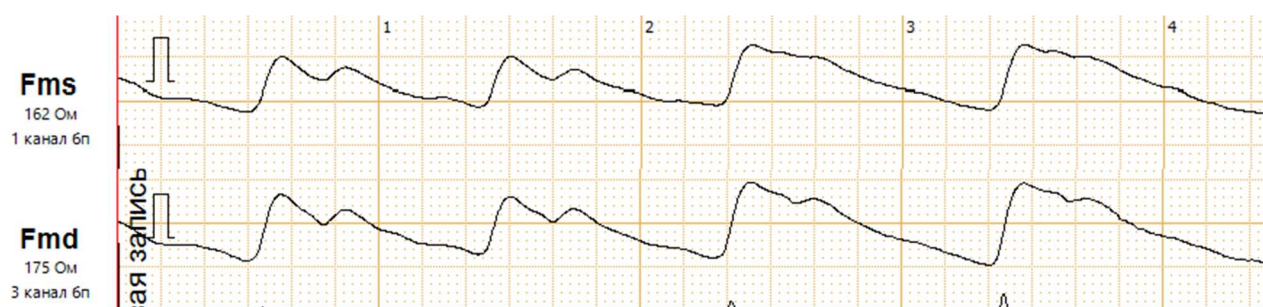


Рисунок 4 – Пример снятых реограмм и показаний импеданса

В исследовании приняли участие 11 условно здоровых молодых людей в возрасте от 19 до 21 года.

### Результаты

В таблице 3 и на рисунке 5 представлены значения импеданса, полученные в результате моделирования и измеренные в соответствии с методикой проведения экспериментальных исследований.

Таблица 3 – Результаты измерений и расчета импеданса объекта при токе частотой 100 кГц

Сторона головы	Значения полного импеданса, Ом											
	Экспериментальные значения для испытуемых											Расчетные значения
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Fms (левая)	220	170	210	230	180	200	210	230	230	230	230	219,14
Fmd (правая)	210	220	210	230	180	200	190	210	220	230	230	218,88

Статистический анализ полученных экспериментально данных показывает, что при частоте 100 кГц:

- средние значения полученных экспериментальных данных равны, соответственно, 212,7 Ом для передней левой половины головы и 211,8 Ом для передней правой половины;
- среднеквадратические отклонения значений составляют, соответственно, 21,5 Ом

для передней левой половины головы и 16,6 Ом для передней правой половины;

- медиана экспериментальных значений равна, соответственно, 220 Ом для передней левой половины головы и 210 Ом для передней правой половины;

- минимальные и максимальные значения равны, соответственно, для передней левой половины головы 170 Ом и 230 Ом, а для передней правой половины 180 Ом и 230 Ом.

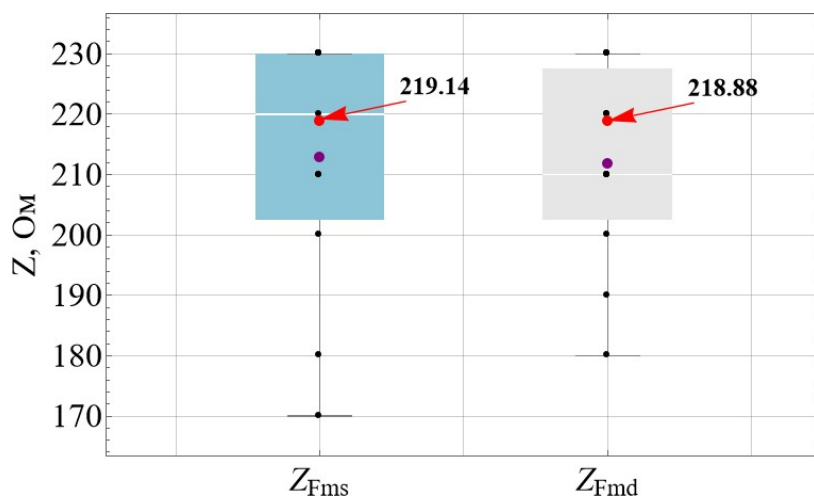


Рисунок 5 – Результаты измерений импеданса объекта исследований

Для проверки адекватности используемой модели аналогично работе [2] использовался t-критерия Стьюдента [9] и F-критерий Фишера [10]. Формулы для расчета представлены ниже:

$$t = (\bar{Z}_{\text{exp}} - \bar{Z}_{\text{model}}) / \sqrt{(\sigma^2 / n)}, \quad (1)$$

где  $\bar{Z}_{\text{exp}}$  – среднее значение результатов исследования;

$\bar{Z}_{\text{model}}$  – значение результатов, полученных моделированием;

$\sigma^2$  – дисперсия выборки результатов исследования;

$n$  – количество данных в выборке.

$$\bar{F} = \sigma_A^2 / \sigma_{(Y)}^2, \quad (2)$$

где  $\sigma^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{i=1}^N (Z_{i \text{ exp}} - Z_{i \text{ model}})^2$  – дисперсия адекватности;

$f$  – разность между числом различных опытов и числом параметров уравнений модели, в данном случае число свободных членов в уравнении Максвелла равно 2-м, представленными плотностью тока и плотностью заряда, а количество данных в выборке 11;

$\sigma_{(Y)}^2$  – дисперсия параметра оптимизации или, средняя дисперсия воспроизводимости [10].

Подставляя в формулу (1) полученные выше результаты исследования для передней левой половины головы и передней правой половины, получим значения  $t$ , равные, соответственно, -0,99 и -1,4. Сравнивая полученные значения с критическим значением  $t_k$ , равным 2,2281 для 11 измерений и уровня значимости 0,05, получим, соответственно:  $-0,99 < 2,2281$  и  $-1,4 < 2,2281$ . Таким образом, можно сделать вывод, что по указанному критерию предлагаемую модель можно признать адекватной для 5 % уровня значимости [9].

Подставляя в формулу (2) полученные выше результаты исследования для передней левой половины головы и передней правой половины, получим значения F-критерия Фишера, равные, соответственно, 7,55 и 8,22. Учитывая, что в сравнении принимает участие в каждом

случае одна выборка, критическим значением является значение, соответствующее распределению хи-квадрат ( $\chi^2$ ), равное в данном случае 16,91. Исходя из найденных значений ( $7,55 < 16,91$  и  $8,22 < 16,91$ ) можно сделать вывод, что предлагаемая модель головы со сложной геометрической структурой и слоями по данному критерию также может считаться адекватной для 5 % уровня значимости [9].

### Заключение

Несмотря на некоторые расхождения экспериментальных значений с теоретическими, которые могут являться следствием как допущенных упрощений модели, так и индивидуальных особенностей каждого организма, рассмотренные выше результаты позволяют заключить, что предложенная модель объекта является адекватной и может быть использована для дальнейших исследований. Ожидается, что предлагаемая модель позволит в будущем исследовать процессы протекания тока через структуры головы с последующим анализом эффективности как диагностического, так и терапевтического электрического воздействия на головной мозг и его сосуды. Вариативность предлагаемой модели объекта может соответствовать также и патологиям, что может упростить задачу поиска и синтеза новых параметров в электрофизиологии для диагностирования различных заболеваний с применением алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта. В свою очередь, данные исследования могут позволить более эффективно подходить к вопросу разработки устройств персонализированной медицины.

*Работа выполнена в ОГУ имени И.С. Тургенева в рамках государственного задания № 075-00196-24-02 на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов от 01.04.2024 г., проект № FSGN-2024-0007 (1023110800218-7-3.2.4;3.1.3;2.6.1).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здравоохранение в России. 2023: Стат.сб. М.: Росстат., 2023. 181 с.
2. Жидков, А.В. Исследование импеданса тканей при различной частоте переменного тока / А. В. Жидков, К. В. Подмастерьев, Д. В. Денисов, Х. А. Абдувосидов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 6 (368). – С. 118-126.
3. Micheels, P A Comparison of Skin Thickness Data from Ultrasonography with Literature Data Obtained via Histology and Magnetic Resonance Imaging: Cheek, Anterior Neck, and Décolleté / P. Micheels, S. Besse, J. Rouijel, S. Viski// Journal of Clinical and Cosmetic Dermatology. 2020. 4. № 3.
4. Gur R. C., Gunning-Dixon F. M., Turetsky B. I., Bilker W. B., Gur R. E. Brain Region and Sex Differences in Age Association With Brain Volume: A Quantitative MRI Study of Healthy Young Adults // The American Journal of Geriatric Psychiatry. 2002. 10. № 1. С. 72–80.
5. COMSOL AB. The AC/DC Module User's Guide. 5-е изд. Stockholm, Sweden: COMSOL AB, 2018. 366 с.
6. Bazaka, K. Implantable Devices: Issues and Challenges / K. Bazaka, M. Jacob // Electronics. 2013. 2. № 1. С. 1–34.
7. Gabriel, C. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies / C. Gabriel // Brooks Air Force Base. San Antonio, Texas. 225 с.
8. Комплекс географический «Рео-Спектр»: методические указания / составители компания Нейрософт. - Иваново: ООО "Нейрософт", 2008. - 142 с.
9. Гланц, С. Медико-биологическая статистика. 4-е изд. / С. Гланц. - М.: Практика, 1998. 459 с.
10. Петров, А. В. Моделирование процессов и систем: учебное пособие / А. В. Петров. — Санкт-Петербург: Лань, 2015. - 288 с.

**Жидков Алексей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл Кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, директор научно-образовательного центра «Инновационные технические решения в области медицины»  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29  
E-mail: epipro@rambler.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, профессор, директор института приборостроения, автоматизации и информационных технологий  
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29 E-mail: asms-orel@mail.ru

## BRAIN IMPEDANCE STUDY

**Abstract.** *A model of human head impedance for the study of biophysical processes by impedance electroplethysmography is proposed. The results of theoretical and experimental studies of tissue impedance at a frequency of 100 kHz are presented. The methodology of the experiment, the equipment used and the obtained impedance values of the anterior parts of the head are described. The conducted statistical analysis confirms the adequacy of the proposed model for estimation of impedance changes in the head structures.*

**Keywords:** *impedance of biological tissues, cerebral blood circulation, impedance electroplethysmography, alternating current, modeling of brain impedance, blood flow in cerebral vessels, electrical impedance of cerebral tissues, monitoring of brain blood flow.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Zdravookhranenie v Rossii. 2023: Stat.sb. M.: Rosstat., 2023. 181 s.
2. Zhidkov, A.V. Issledovanie impedansa tkanei pri razlichnoi chastote peremennogo toka / A. V. Zhidkov, K. V. Podmaster'ev, D. V. Denisov, Kh. A. Abduvosidov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – № 6 (368). – S. 118-126.
3. Micheels, P A Comparison of Skin Thickness Data from Ultrasonography with Literature Data Obtained via Histology and Magnetic Resonance Imaging: Cheek, Anterior Neck, and Décolleté / P. Micheels, S. Besse, J. Rouijel, S. Viski // Journal of Clinical and Cosmetic Dermatology. 2020. 4. № 3.
4. Gur R. C., Gunning-Dixon F. M., Turetsky B. I., Bilker W. B., Gur R. E. Brain Region and Sex Differences in Age Association With Brain Volume: A Quantitative MRI Study of Healthy Young Adults // The American Journal of Geriatric Psychiatry. 2002. 10. № 1. S. 72–80.
5. COMSOL AB. The AC/DC Module User's Guide. 5-e izd. Stockholm, Sweden: COMSOL AB, 2018. 366 s.
6. Bazaka, K. Implantable Devices: Issues and Challenges / K. Bazaka, M. Jacob // Electronics. 2013. 2. № 1. S. 1–34.
7. Gabriel, C. Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies / S. Gabriel // Brooks Air Force Base. San Antonio, Texas. 225 s.
8. Kompleks reograficheskii «Reo-Spektr»: metodicheskie ukazaniya / sostaviteli kompaniya Neurosoft. - Ivanovo: OOO «Neurosoft», 2008. - 142 s.
9. Glants, S. Mediko-biologicheskaya statistika. 4-e izd. / S. Glants. - M.: Praktika, 1998. 459 s.
10. Petrov, A. V. Modelirovanie protsessov i sistem: uchebnoe posobie / A. V. Petrov. — Sankt-Peterburg: Lan', 2015. - 288 s.

**Zhidkov Aleksey Vladimirovich**  
Federal State Budgetary Educational  
Institution of Higher Education «Orel  
State University named after  
I.S. Turgenev»,  
Candidate of Technical Sciences,  
Department of Instrument  
Engineering, Metrology and  
Certification 302020, Orel,  
Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: epipro@rambler.ru

**Denisov Dmitry Vitalievich**  
Federal State Budgetary Educational  
Institution of Higher Education «Orel  
State University named after I.S.  
Turgenev»,  
Student of the Department of Instrument  
Engineering, Metrology and  
Certification  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: 4567426@mail.ru

**Podmaster'ev Konstantin Valentinovich**  
Federal State Budgetary Educational  
Institution of Higher Education «Orel State  
University named after I.S. Turgenev»,  
Doctor of Technical Sciences, profecor,  
director of the Institute of Instrument  
Engineering, Automation and Information  
Technologies  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

© Жидков А.В., Подмастерьев К.В., Денисов Д.В., 2025

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

УДК 005.6

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-369-1-61-68

ВОРОНОВ Г.Г., СОЛЯНИК А.И., КЛЕЙМЕНОВА Н.Л., НАЗИНА Л.И.

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И РИСКОВ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ЦЕЛЕЙ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА**

**Аннотация.** В статье рассмотрены подходы к идентификации и анализу возможностей и рисков (угроз) для коммерческой компании. Приведены способы выявления установленного набора возможностей и рисков (угроз) для организации. Отражены инструменты установления возможностей и рисков (угроз), используемые на различных этапах управления рисками. Показаны примеры критериев оценки вероятности возникновения риска, посредством применения матрицы «Оценка рисков и возможностей». Изучение факторов, влияющих на возникновение рисков, и возможностей их нивелирования, позволяет внедрять управление ими в действующую систему управления компанией, а также эффективнее реагировать на возможные изменения, что в свою очередь положительно отражается на выстраивании единого механизма управления организацией в целом. Результаты исследования могут быть применены на промышленном предприятии химической, нефтехимической, машиностроительной отрасли экономики.

**Ключевые слова:** риски, внешние и внутренние факторы, качество, система менеджмента качества.

### **Введение**

В настоящее время для успешного развития компании в ее управление все чаще внедряют систему менеджмента качества. Такая система позволяет создавать продукцию, которая удовлетворяет требованиям потребителей. Одним из положений системы менеджмента качества является анализ требований потребителей с целью определения процессов, способствующих созданию продукции, приемлемой для них [1]. Наряду с этим важным является возможность поддерживать такие процессы в управляемом состоянии, что в будущем оказывает положительное влияние на повышение удовлетворенности потребителей [2]. В состав системы менеджмента качества входит политика и цели в области качества, организационные документы, процессы, процедуры, ресурсы, которые нужны для управления качеством. Необходимо отметить, что зачастую организации функционируют в условиях постоянно изменяющейся внешней и внутренней среды. Для того чтобы максимизировать прибыль компании и минимизировать возникающие риски, необходимо выстроить систему управления рисками [3, 4]. Такая система управления рисками является важным элементом управления организацией и ее эффективность напрямую влияет на дальнейшую стратегию развития компании на рынке.

Актуальность работы - способность организации достигнуть запланированные цели в области качества с целью разработки стратегического направления развития с учетом изменяющихся внутренних и внешних факторов.

Целью является выявление и анализ возможности рисков организации, которые могут повлиять на способность организации достигать запланированных результатов.

Задачи: определить внешние и внутренние факторы организации; оценить возможности и угрозы, связанные с ними; разработать систему критериев оценки вероятности возникновения рисков; определение условий управления с целью принятия первоочередных мероприятий.

### **Основная часть**

Для определения внешних и внутренних факторов учитываются требования и ожидания целевых групп заинтересованных сторон, что позволит проанализировать и оценить возможности и риски, влияющие на достижение результатов системы менеджмента качества (СМК). В состав целевых групп заинтересованных сторон с их требованиями и ожиданиями к СМК необходимо включать: заказчиков (и их потребителей), конкурентов, Правительство РФ, федеральные органы власти, областную администрацию, налоговые органы, общественность, трудовой коллектив, поставщиков и аутсорсеров, партнеров и т.д. [5, 6].

Рассмотрим пример выявления возможностей и рисков компании для реализации или невыполнения требований и ожиданий заинтересованных сторон по целевым группам, который представлен в таблице 1.

Таблица 1– Примеры выявления возможностей и рисков компании

Внешние и внутренние факторы	Возможности	Риски (угрозы)
Квалификация и опыт сотрудников, выполняющих работы по разработке проектной документации	Повышение качества и сокращение срока разработки и производства оборудования. Повышение квалификации сотрудников. Повышение качества проектной документации. Сокращение сроков проектирования	Претензии по качеству и срокам работ. Несвоевременное предоставление исходных данных для проектирования. Низкая платежеспособность заказчика
Уровень изучения конкурентных преимуществ компании	Повышение эффективности работы (получение конкурентоспособной цены)	Потеря объёмов работ из-за преимуществ (стоимость, качество и сроки) конкурентов
Отклонение фактического объема производства продукции от бизнес-плана	Улучшение показателей по срокам, качеству и стоимости материалов и комплектующих	Срыв сроков, претензии к качеству, повышение стоимости материалов
Диверсификационная стратегия	Расширение сфер деятельности с партнерами	Отказ от партнерских соглашений
Производственно-технологический потенциал региона	Участие в формировании совместных программ развития региона	Несвоевременная уплата налогов
Степень ответственности компании	Повышение репутации (имиджа) компании перед общественностью	Сокращение договоров из-за высокого общественного давления на организацию. Перекрытие подъездных путей к территории компании. Падение деловой репутации компании
Мотивация персонала	Расширение влияния на принятие решений и деятельность компании. Улучшение организации труда и мотивации к нему сотрудников	Увольнение квалифицированных сотрудников из-за низкой мотивации
Использование преимуществ саморегулируемых организаций (СРО)	Коллективная ответственность членов СРО за срыв сроков проектирования и причинения вреда третьим лицам. Повышение квалификации проектировщиков	Исключение из СРО в случае невыполнения его требований и прекращение проектной деятельности

При определении целевых групп заинтересованных сторон и составлении карт стейкхолдеров учитываются все осуществляемые виды работ структурных подразделений компании для обеспечения и выполнения основных направлений деятельности [7, 8]. Ответственность за определение, анализ, оценку и мониторинг требований и ожиданий заинтересованных сторон установлена в матрице распределения ответственности в

Руководстве по качеству.

При определении факторов макросреды формируется структура из заинтересованных сторон, связанная с заказчиками и потребителями, инновационными, проектными и технологическими аспектами, конкуренцией, поставщиками, партнерами, законодательством, экспертными организациями, надзорными органами, социальными аспектами, экономическими политиками и условиями, как на международном, так и на региональном уровне [9, 10].

При определении внешних факторов сотрудники могут использовать метод «мозгового штурма». Пример выявления возможностей и рисков внешних факторов компании представлен в таблице 2.

В ходе совещания по качеству с высшим руководством компании определяют возможности и риски (угрозы), имеющие отношения к намерениям и стратегии развития в протоколе.

Факторы микросреды включают выявленные ранее целевые группы заинтересованных сторон, которые прямо влияют на основные направления деятельности компании в рамках области применения системы менеджмента качества из Руководства по качеству, на достижение текущих целей и могут влиять на стратегические цели в области качества [11, 12].

При определении факторов микросреды формируется структура внутренних факторов, связанных с разработкой, производством оборудования для заказчиков, управлением персоналом, ресурсами, процессами (деятельностью) и ключевыми показателями деятельности компании. При определении внутренних факторов сотрудники могут использовать метод «мозгового штурма».

Таблица 2 – Пример выявления возможностей и рисков внешних факторов компании

Внешние факторы (макросреды)	Возможности	Риски (угрозы)
Международная политика, макроэкономика и внешние рынки	Увеличение объемов заказов по существующим и новым видам оборудования в Китай, Южную Корею, Сингапур, Индию и страны Латинской Америки из-за американских и европейских санкций с последующим увеличением работ по разработке изготовленного оборудования	Введение новых экономических и торговых санкций на поставку нефтегазодобывающего и промышленного оборудования
Государственная экономика, внутренний рынок РФ и отраслевые политики	Увеличение доли на рынке по объему продаж оборудования по пяти позициям программы импортозамещения	Отказ заказчиков закупать оборудование по программе импортозамещения РФ, гиперинфляция
Отношение заказчиков и конечных потребителей к продуктам и услугам	Ведение разработок по улучшению технических, эксплуатационных и эргономических характеристик по существующей номенклатуре оборудования	Наличие претензий по качеству (герметичности, пайки, склеивания и т.д.), как устранимых, так и неустранимых в оборудовании
Конкуренция	Выпуск уникальных проектов и видов оборудования, не имеющих аналогов у конкурентов	Потеря объемов проектирования и производства при появлении у конкурентов лучших аналогов по характеристикам материалов, технологиям работы оборудования, техническим решениям, стоимости

Инновации, техника и технология работ	Освоение новых технологий и устройств	Несоответствие новым техническим требованиям заказчика.
Эффективность работы по поиску взаимовыгодных поставщиков	Поиск новых поставщиков и партнеров на внутреннем рынке (из-за введения санкций на работы с зарубежными поставщиками по материалам и устройствам, входящим в состав проектов)	Низкое качество или снижение качества комплектующих, материалов и устройств поставщиков
Законодательно-нормативные требования. Требования надзорных органов	Получение разрешений Федеральной службы по экологическому и технологическому надзору РФ по новому оборудованию. Получение положительных заключений от экспертных организаций, на общественных слушаниях. Создание комфортных и безопасных условий труда. Участие в тендерах	Получение протоколов, актов и предписаний от контролирующих и надзорных органов
Социальные условия и обязательства	Улучшение социальной защищенности работников. Повышение мотивации к труду у сотрудников	Увеличение социальных обязательств по финансированию региональных и федеральных программ защиты населения. Уход персонала к конкурентам

Следующим шагом в формировании внутренних факторов является группирование возможностей и рисков с учетом требований и ожиданий заинтересованных сторон по категориям сильных и слабых сторон компании. Пример оформления сильных и слабых сторон по внутренним факторам представлен в таблице 3.

В ходе совещания по качеству с высшим руководством компании определяют сильные и слабые стороны, а также возможности и риски (угрозы), имеющие отношение к намерениям и стратегии развития компании.

Для проведения анализа и оценки возможностей и рисков всех факторов применяется матрица «Оценка рисков и возможностей», которая позволяет установить уровень (степень приемлемости) их отношения к намерениям и стратегии развития компании при реализации целей в области качества. Анализ и оценка степени влияния и вероятности (возникновения рисков или реализации возможностей) проводится экспертным методом, в соответствии со значениями от 1 до 3 из матрицы «Оценка рисков и возможностей» (рисунок 1).

Факторы, имеющие первый уровень (оценка уровня «высокие»), а в отдельных случаях и второй уровень (оценка уровня «значительные») рисков и возможностей, могут быть основой для выбора направлений целей в области качества, как стратегических, так и текущих (операционных).

Оценка влияния внешних и внутренних факторов, имеющих отношение к деятельности компании, позволяет выявить сильные и слабые стороны, определить возможности для успешной работы ее на рынке оборудования и услуг, а также наметить мероприятия по предотвращению угроз.

Для формирования выводов по результатам анализа, а также оценки рисков и возможностей по внешним и внутренним факторам компании используется матрица «Оценка рисков и возможностей».

Таблица 3 – Пример оформления сильных и слабых сторон по внутренним факторам

Внутренний фактор	Наименование сильной стороны	Возможности	Наименование слабой стороны	Риски (угрозы)
Разработка и производство оборудования для заказчиков	Длительное присутствие на рынке нефтегазового, химического оборудования	Освоение новых видов оборудования для зарубежных (азиатского региона, ближайшего зарубежья и т.д.) заказчиков	Недостаточное количество долгосрочных договоров на поставку оборудования, проектирования объектов	Отказ от освоения новых видов оборудования для зарубежных заказчиков в течение года
Своевременное выполнение договорных обязательств	Четкая организация процесса проектирования	Улучшение организации проектирования путем использования передовых технических решений в области охраны окружающей среды	Возможное невыполнение календарного графика проектирования по независящим от проектировщика причинам	Срыв срока выполнения



Рисунок 1 – Матрица «Оценка рисков и возможностей»

В матрице определены уровни управления (степень приемлемости возможностей и неприемлемости (недопустимости)) рисков или угроз компании, которые характеризуют уровень отношений факторов к намерениям и стратегии развития компании с учетом влияния на реализацию целей в области качества.

Все возможности внешних и внутренних факторов, имеющие первый (и/или второй) уровень управления, заносят в таблицу 4.

Таблица 4 – Пример оформления возможностей внешних и внутренних факторов

Наименование возможности	Оценка	Уровень управления

Пример оформления уровня высоких возможностей по внешним факторам представлен в таблице 5.

Таблица 5– Пример оформления уровня высоких возможностей по внешним факторам

Наименование возможности	Оценка	Уровень управления
Улучшение технических, эксплуатационных и эргономических характеристик по номенклатуре оборудования	9	1
Поиск и применение технических устройств для включения в состав оборудования по повышению его производительности и надежности по аналогам мировых производителей	9	1

Пример оформления высоких рисков (угроз) по внешним факторам представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Пример оформления высоких рисков (угроз) по внешним факторам

Наименование угрозы	Оценка	Уровень управления
Наличие претензий по качеству, как устранимых, так и неустранимых в оборудовании	9	1
Неремонтопригодность дорогостоящих технических средств	6	2

Пример оформления уровня высоких возможностей по внешним факторам представлен в таблице 7.

Таблица 7– Пример оформления уровня высоких возможностей по внешним факторам

Наименование сильных сторон компании	Оценка	Уровень управления
Разработка инновационных продуктов для различных отраслей выше мировых аналогов	9	1
Освоение новых видов оборудования в различных сегментах внутреннего рынка	9	1

Пример оформления высоких рисков (угроз) по внешним факторам представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Пример оформления высоких рисков по внешним факторам

Наименование слабых сторон компании	Оценка	Уровень управления
Неудовлетворенность заказчиков имиджем компании для выбора в качестве исполнителя работ	9	1
Отказ от освоения новых видов оборудования для отечественных и зарубежных заказчиков в течение года	9	1

Все проанализированные факторы, имеющие первый уровень управления, считаются приоритетными при выборе стратегических и текущих целей в области качества. В некоторых случаях высшее руководство может принять во внимание приемлемые возможности и неприемлемыми риски, имеющие второй уровень управления по отношению к намерениям и стратегии развития компании.

### Заключение

Установлены внешние и внутренние факторы организации, оценены возможности и угрозы, связанные с ними, разработана система критериев оценки вероятности возникновения рисков и определены условия управления с целью принятия первоочередных мероприятий. Таким образом, успех идентификации рисков и возможностей, а также определение эффективного инструментария для их управления является центральной составляющей

системы менеджмента качества. Грамотно выстроенная система управления рисками дает возможность быстро реагировать на возникающие изменения в различных процессах, повышает результативность деятельности в области управления рисками, и что в дальнейшем позволяет компании непрерывно совершенствоваться и динамично развиваться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилин, Я.А. Некоторые аспекты разработки и применения методики оценки результативности процесса управления рисками / Я.А. Вавилин, Н.Ю. Чистоклетов, В.Г. Солдатов, В.В. Ермакова // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 239-242.
2. Nazina, L.I. Assessment of learning outcomes in the university quality management system / L.I. Nazina, N.L. Kleimenova, O.S. Nikulcheva, A.N. Pegina, O.V. Pribytkova, G.N. Egorova // Сборник: Proceedings of the Russian Conference on Digital Economy and Knowledge Management (RuDEcK 2020). Серия: Advances in economics, business and management research. Voronezh. – 2020. – С. 478-483.
3. Василенкова, Н.В. Управление рисками в системе менеджмента качества организации / Н.В. Василенкова, Н.Ю. Афицкий, С.С. Иксанова, А.В. Мкртчян // Интернаука. – 2021. – №44-4(220). – С. 38-40.
4. Бачинский, А.Г. Управление рисками в системе менеджмента качества организации / А.Г. Бачинский, П.Н. Майкова, Ю.О. Дорошенко // Форум молодых ученых. – 2019. – № 10(38). С. 94-98.
5. Федосеева, Р.А. Управление рисками бизнес-процессов в системе менеджмента качества организации / Р.А. Федосеева, И.Д. Егоров, Л.М. Левшин, Е.В. Трошкова // Управленческий учет. – 2024. – № 4. – С. 450-460.
6. Васильева, О.В. Анализ рисков при проведении внутреннего аудита на предприятии с интегрированной системой менеджмента / О.В. Васильева, Л.И. Назина, Б.Н. Квашнин, Н.Л. Клейменова // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 8-1. – С. 136-140.
7. Александров, С.Л. Возможности организации / С.Л. Александров, В.А. Волков, Е.В. Дубровская // Стандарты и качество. – 2022. – № 1. – С. 78-83.
8. Меренков, И.А. Инструменты риск менеджмента, влияющие на уровень конкурентоспособности продукции / И.А. Меренков // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 1(150). – С. 856-858.
9. Антонов, А.В. Метод и методика менеджмента качества критически значимых рисков / А.В. Антонов, В.В. Сидорин // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 9. – С. 9-23.
10. Воронов, Г.Г. Стратегический менеджмент: контекст с привлечением заинтересованных сторон / Г.Г. Воронов, Н.Л. Клейменова, Г.Г. Воронов, А.И. Соляник // Известия Тульского государственного университета: технические науки. – 2024. – Вып. 3. – С. 432-435.
11. Брыкалов, С.М. Подходы к управлению рисками менеджмента качества / С.М. Брыкалов, В.Ю. Трифонов, К.А. Романова // Проблемы анализа риска. – 2023. – Т. 20. – № 6. – С. 70-82.
12. Марин, К.Е. Управление рисками в процессе организационной эволюции / К.Е. Марин // Управление финансовыми рисками. – 2024. – № 2. – 90-107.

**Воронов Геннадий Геннадьевич**  
ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж  
Аспирант кафедры управления качеством,  
гостиничного дела и туризма  
394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19  
E-mail: eco-inna@mail.ru

**Клейменова Наталья Леонидовна**  
ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж  
Доцент кафедры управления качеством, гостиничного  
дела и туризма  
394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19  
E-mail: klesha78@list.ru

**Соляник Анатолий Иванович**  
Воронежский филиал «Академия стандартизации,  
метрологии и сертификации»  
Директор  
394036, г. Воронеж, ул. Рабочий городок, 1  
E-mail: dir@asms-vrn.ru

**Назина Людмила Ивановна**  
ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж  
Доцент кафедры управления качеством, гостиничного  
дела и туризма  
394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19  
E-mail: nazina\_lyudmila@mail.ru

VORONOV G.G., SOLYANIK A.I., KLEIMENOVA N.L., NAZINA L.I.

## IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF OPPORTUNITIES AND RISKS OF EXTERNAL AND INTERNAL FACTORS IN QUALITY GOALS SETTING

**Abstract.** The article discusses approaches to the identification and analysis of opportunities and risks (threats) for a commercial company. The ways to identify an established set of opportunities and risks (threats) for an organization are given. The tools for identifying opportunities and risks (threats) used at various stages of risk management are reflected. Examples of criteria for assessing the probability of risk occurrence are shown by using the matrix "Assessment of risks and opportunities". Studying the factors influencing the occurrence of risks and the possibilities of leveling them allows you to implement their management into the current management system of the company, as well as respond more

*effectively to possible changes, which in turn has a positive effect on building a unified management mechanism for the organization as a whole. The results of the study can be applied at an industrial enterprise in the chemical, petrochemical, and machine-building sectors of the economy.*

**Keywords:** risks, external and internal factors, quality, the quality management system.

## BIBLIOGRAPHY

1. Vavilin, Ya.A. Some aspects of the development and application of a methodology for evaluating the effectiveness of the risk management process / Ya.A. Vavilin, N.Y. Chistokletov, V.G. Soldatov, V.V. Ermakova // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. - 2023. - No. 3. - pp. 239-242.
2. Nazina, L.I. Assessment of learning outcomes in the university quality management system / L.I. Nazina, N.L. Kleimenova, O.S. Nikulcheva, A.N. Pegina, O.V. Pribytkova, G.N. Egorova // V sbornike: Proceedings of the Russian Conference on Digital Economy and Knowledge Management (RuDEcK 2020). Seriya: Advances in economics, business and management research. Voronezh. - 2020. - S. 478-483.
3. Vasilenkova, N.V. Risk management in the quality management system of the organization / N.V. Vasilenkova, N.Yu. Afitsky, S.S. Iksanova, A.V. Mkrtchyan // Internauka. - 2021. - №44-4(220). - Pp. 38-40.
4. Bachinsky, A.G. Risk management in the quality management system of an organization / A.G. Bachinsky, P.N. Maikova, Yu.O. Doroshenko // Forum of Young Scientists. - 2019. - № 10(38). Pp. 94-98.
5. Fedoseeva, R.A. Risk management of business processes in the quality management system of an organization / R.A. Fedoseeva, I.D. Egorov, L.M. Levshin, E.V. Troshkova // Managerial accounting. - 2024. - No. 4. - pp. 450-460.
6. Vasileva, O.V. Analiz riskov pri provedenii vnutrennego audita na predpriyatii s integrirovannoj sistemoj menedzhmenta / O.V. Vasileva, L.I. Nazina, B.N. Kvashnin, N.L. Klejmenova // Fundamentalnye issledovaniya. - 2017. - № 8-1. - S. 136-140.
7. Alexandrov, S.L. Possibilities of organization / S.L. Alexandrov, V.A. Volkov, E.V. Dubrovskaya // Standards and quality. - 2022. - No. 1. - pp. 78-83.
8. Merenkov, I.A. Risk management tools affecting the level of competitiveness of products / I.A. Merenkov // Economics and entrepreneurship. - 2023. - № 1(150). - Pp. 856-858.
9. Antonov, A.V. Method and methodology of quality management of critically significant risks / A.V. Antonov, V.V. Sidorin // Modern high-tech technologies. - 2021. - No. 9. - pp. 9-23.
10. Voronov, G.G. Strategic management: a context involving stakeholders / G.G. Voronov, N.L. Kleimenova, G.G. Voronov, A.I. Solyanik // Izvestiya Tula State University: technical Sciences. - 2024. - Issue 3. - pp. 432-435.
11. Brykalov, S.M. Approaches to risk management of quality management / S.M. Brykalov, V.Yu. Trifonov, K.A. Romanova // Problems of risk analysis. - 2023. - Vol. 20. - No. 6. - pp. 70-82.
12. Marin, K.E. Risk management in the process of organizational evolution / K.E. Marin // Financial risk management. - 2024. - № 2. - 90-107.

**Voronov Gennady Gennadievich**

FSBEI HE «VSUET»

Postgraduate student of the Department of Quality Management, Hotel business and Tourism  
394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19,  
E-mail: eco-inna@mail.ru

**Kleimenova Natalia Leonidovna**

FSBEI HE «VSUET»

Associate Professor of the Department of Quality Management, Hotel business and Tourism  
394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19,  
E-mail: klesha78@list.ru

**Solyanik Anatoly Ivanovich**

Voronezh branch «Academy of Standardization, Metrology and Certification»  
Director  
394036, Voronezh, Rabochy Gorodok str., 1  
E-mail: dir@asms-vrn.ru

**Nazina Lyudmila Ivanovna**

FSBEI HE «VSUET»

Associate Professor of the Department of Quality Management, Hotel business and Tourism  
394036, Voronezh, Revolution Avenue, 19,  
E-mail: nazina\_lyudmila@mail.ru

© Воронов Г.Г., Соляник А.И., Клейменова Н.Л., Назина Л.И., 2025

ГЕОРГИЕВСКАЯ Е.В., ГЕОРГИЕВСКИЙ Р.Н., ГЕОРГИЕВСКИЙ Н.В.

## СТРУКТУРИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПО КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** Высокие стандарты надежности и безопасности в энергетике вынуждают уделять повышенное внимание управлению жизненным циклом энергетического оборудования, особенно эксплуатируемого за пределами своего проектного срока службы. Одной из составляющих эффективной системы управления жизненным циклом оборудования является база данных по контролю состояния металла ресурсопределяющих узлов, содержащая чистые цифровые данные в структурированном виде. В настоящее время для подавляющего большинства единиц оборудования такая база отсутствует, что приводит к ошибкам при прогнозировании изменения технического состояния оборудования и неправильным управленческим решениям по техническому воздействию на оборудование. В статье на примере крупной паровой турбины описан подход и методические основы построения структурированной базы данных по результатам контроля состояния металла, которую в дальнейшем можно интегрировать в унифицированную цифровую платформу в целях управления жизненным циклом энергооборудования.

**Ключевые слова:** паровая турбина, управление жизненным циклом, база данных, контроль состояния металла.

### Введение

Управление жизненным циклом основного генерирующего оборудования невозможно представить вне цифровых технологий. Эффективность внедряемых цифровых платформенных решений во многом определяется качеством оцифровки исходной информации о конструкции, режимах работы и изменении состоянии металла узлов оборудования. Зачастую данные хранятся в разрозненном, неструктурированном виде: неполный набор чертежей, суточные ведомости, журналы дефектов, набор рукописных и/или сканированных документов по неразрушающему контролю и т.п.

Важно отметить, что оцифровка подразумевает не только замену бумажных носителей и аналоговых сигналов на цифровые эквиваленты, а полноценный переход к структурированным чистым цифровым данным, пригодным для дальнейшего анализа. Во многих областях энергетики проблема оцифровки исходной информации до сих пор не решается системно, а сам процесс оцифровки протекает медленно и не всегда эффективно. Этому способствует ряд характерных особенностей крупного энергооборудования, эксплуатируемого на российских электростанциях, который не позволяет применять типовые решения и эталонные модели:

- высокая степень индивидуальности;
- различный уровень оснащенности контрольными приборами;
- различные системы технического обслуживания и ремонта;
- длительный срок службы, сопровождающийся частичными модернизациями, реконструкциями, изменениями условий эксплуатации и т.п.;
- частая смена подрядчиков, выполняющих техническое обслуживание, ремонт, контроль состояния оборудования, обусловленная обязательной тендерной системой закупок;
- отсутствие локальных нормативных актов, предъявляющих требования к порядку, составу и форме предоставления отчетной документации.

В статье на примере мощной паровой турбины изложена концепция комплексной методики структурирования базы данных по контролю состояния металла энергооборудования в рамках цифрового перехода, нацеленная на эффективное управление жизненным циклом, обеспечение надежности и безопасности эксплуатации оборудования и электростанции в целом.

### Объект исследования

В рамках данной статьи рассматриваются паровые турбины мощностью более 25 МВт, с температурой острого пара не ниже 450°C, что обуславливает влияние эффекта ползучести

металла [1] для основных ресурсопределяющих узлов (ротора, литые корпусные детали) – наиболее термонагруженных элементов, определяющих ресурс турбины в целом [2-8]. Отказ этих узлов приводит к аварийному останову всего турбоагрегата с последующим длительным простоем и дорогостоящим ремонтом.

Продолжительность жизненного цикла паровой турбины зависит от ее индивидуального ресурса, который, в соответствии с требованиями отраслевых нормативных документов, определяется двумя параметрами – наработкой и количеством пусков.

В зависимости от:

- типа турбины;
- ее мощности;
- рабочих параметров пара;
- конструктивно-технологических особенностей;
- фактических режимов работы;
- периодичности и качества проведенных ремонтно-восстановительных работ

индивидуальный ресурс может существенно меняться [4-5, 7, 9-10]. Так, при парковом значении ресурса 100-250 тыс. ч [3, 11] известны случаи, когда индивидуальный ресурс составил более до 450 тыс. ч [12].

В настоящее время более 80% эксплуатируемого на российских ТЭС энергетического оборудования работает за пределами паркового ресурса [13] и требует повышенного внимания к оценке его технического состояния, надежности и безопасности эксплуатации, что невозможно без регулярного систематизированного анализа данных об изменении во времени состояния металла ресурсопределяющих узлов. В свою очередь, такой анализ невозможен без полноценной базы данных, позволяющей:

- четко идентифицировать дефекты, их размеры, местоположение и развитие во времени;
- отслеживать изменение физико-механических характеристик и структурных изменений материала, отражающих его старение в условиях эксплуатации и позволяющих определять фактическую скорость деградации материала во времени.

Для большей конкретики представленные в статье подходы иллюстрируются на примере мощной двухцилиндровой паровой турбины с системой промперегрева.

### **Теоретические основы**

Жизненный цикл турбины определяется ее индивидуальным ресурсом. В свою очередь, индивидуальный ресурс турбины определяется минимальным значением индивидуального ресурса ее ресурсопределяющих узлов. Остаточный ресурс – это интервал от текущего состояния турбины до достижения предельного состояния (разрушения) хотя бы одного ресурсопределяющего узла. При этом под разрушением понимается не только разделение узла на отдельные фрагменты, но и появление опасных трещин или иных дефектов, при которых узел не может быть допущен к дальнейшей эксплуатации.

Доминирующим механизмом разрушения ресурсопределяющих узлов турбины является естественный процесс старения материала в условиях нормальной эксплуатации турбины, выражающийся в постепенном накоплении повреждений с учетом эффектов ползучести и усталости в условиях высоких температур и переменных нагрузок [4, 6, 12]. В результате старения в ресурсопределяющих узлах турбины возникают трещины, препятствующие дальнейшей эксплуатации.

Индивидуальный ресурс турбины определяют следующие основные факторы:

- конструктивное исполнение;
- используемые материалы и их фактические характеристики;
- технология изготовления, сборки узлов и монтажа турбины;
- общая наработка;
- фактические параметры пара и их часовые, суточные, сезонные и иные колебания;
- фактические режимы работы турбоагрегата в разных эксплуатационных диапазонах;
- количество пусков/остановов;

– качество системы технического обслуживания и ремонта.

Фактическое техническое состояние ресурсопределяющих узлов турбины устанавливают на основании результатов расширенного диагностирования оборудования (рисунок 1), как правило совмещаемого с капитальными ремонтами, когда производится разборка агрегата и ресурсопределяющие узлы доступны для всестороннего контроля.



Рисунок 1 – Расширенное диагностирование ресурсопределяющих узлов турбины

### Методические основы построения базы по контролю состояния металла

Построение структурированной базы данных по контролю состояния металла предусматривает четыре последовательных этапа.

**1. Иерархическое структурирование.** На данном этапе турбина последовательно разделяется на функциональные узлы, составляющие их элементы и детали с учетом конструктивных особенностей и назначения. Также происходит выделение ресурсопределяющих узлов/элементов (Рисунок 2, ресурсопределяющие узлы выделены цветом), к которым предъявляются повышенные требования в части контроля состояния металла. В дальнейшем сбор, сортировка, анализ данных происходят в соответствии с принятой иерархией.

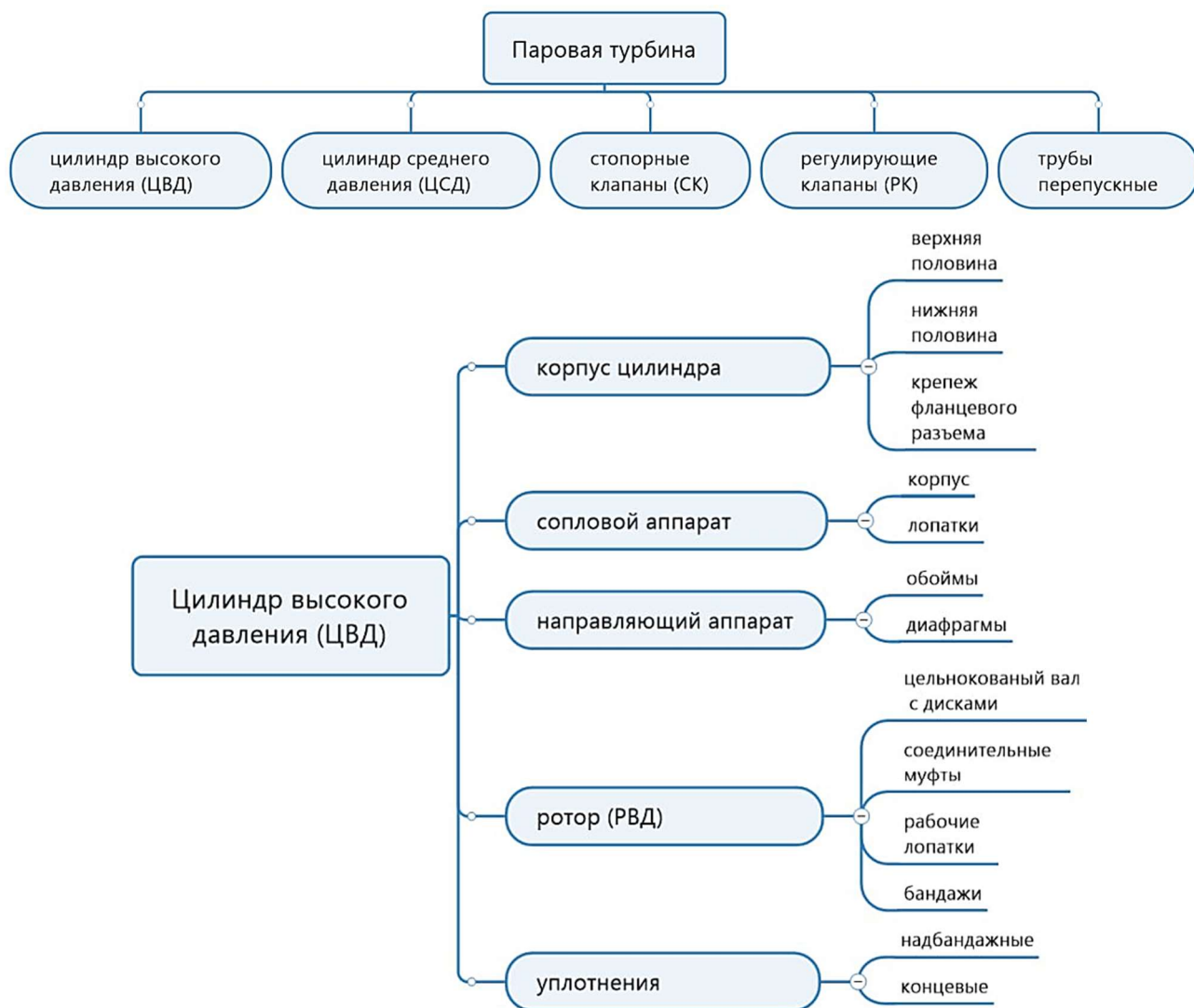


Рисунок 2 – Иерархическая структура: функциональные узлы и пример структурирования ЦВД

**2. Сбор и первичная оцифровка данных.** Полный перечень собираемых данных определяется особенностями конструкции и эксплуатации объекта и отражается в индивидуальной программе расширенного диагностирования. Помимо результатов расширенного диагностирования собираются все имеющиеся результаты неразрушающего и разрушающего контроля, металлографических исследований, натурных и лабораторных испытаний за весь период эксплуатации.

На данном этапе вся информация, представленная в бумажном, сканированном или электронном виде должна быть переведена в цифровой формат – редактируемый документ, пригодный для дальнейшей обработки. Для этого разрабатываются специальные формуляры для каждого типа контроля и каждого контролируемого узла и/или элемента, позволяющие однозначно идентифицировать дефекты и прослеживать их развитие во времени. В идеале формы таких формуляров должны быть закреплены локальным нормативным актом (Стандартом предприятия), отражать специфику оборудования и принятые формы ведения технической документации, а также являться неотъемлемой частью тендерной документации на проведение технического диагностирования турбины и аналогичных по содержанию работ.

**3. Анализ и очистка данных.** Целью данного этапа является получение набора чистых данных, которые в дальнейшем войдут в структурированную базу. Для этого последовательно выполняются следующие операции:

- исключение опечаток, технических ошибок;
- оценка полноты данных;

–проверка данных на достоверность, допустимость, правдоподобие, непротиворечивость;

–проверка данных на соответствие отраслевым стандартам.

В настоящее время этот этап работы либо выполняется вручную, либо почти игнорируется в силу отсутствия конкретных критериев и алгоритмов анализа и очистки данных.

**4. Итоговая оцифровка данных и построение структурированной базы.** Целью данного этапа является переход от набора чистых разрозненных данных к построению структурированной базы, пригодной в дальнейшем для управления жизненным циклом турбины, включая анализ и прогнозирование надежности и ресурса. Структурированная база должна позволять получать в унифицированном формате все необходимые сведения о состоянии металла, строить тренды изменения количественных характеристик, отслеживать динамику развития дефектов.

Для этого необходимо выполнить следующие действия:

–классифицировать контролируемые/измеряемые параметры и характеристики с привязкой к иерархической структуре;

–систематизировать данные с учетом их влияния на возможность дальнейшей эксплуатации и продолжительность жизненного цикла;

–проверить полноту проведенного диагностирования (сопоставить результаты контроля с индивидуальной программой диагностирования турбины);

–охарактеризовать все обнаруженные дефекты (указать количество, характерные размеры, положение, особенности);

–провести ранжирование обнаруженных дефектов по принципу: «годен – НЕ годен»), т.е. установить соответствия между величиной контролируемых параметров/характеристик и их допустимыми значениями;

–внести информацию о проведенном восстановительном ремонте;

–внести информацию о рекомендациях экспертов по ограничениям дальнейшей эксплуатации после ремонта.

Для получения исходных данных об обнаруженных эксплуатационных дефектах предполагается по каждому виду контроля и по каждому узлу из иерархической схемы заполнить двухуровневые формы.

Первый уровень – сводная форма «Результаты контроля» (рисунок 3) – качественная оценка идентификации дефекта «да (дефект обнаружен)/нет (дефект не обнаружен)» или количественное значение контролируемого параметра (например, среднее значение твердости, минимальная толщина).

Второй (вложенный) уровень – стандартизированная форма, содержащая необходимые уточнения, например, местоположение и размеры дефектов, промежуточные результаты измерений количественных параметров и т.п. Второй уровень открывается при наличии отметки «да» относительно идентификации дефекта (форма «Описание и ранжирование дефектов» – рисунок 4) или в случае, когда итоговый количественный параметр, принимаемый для дальнейших оценок надежности и ресурса, складывается из набора первичных данных (форма «Расчет итогового значения» – рисунок 5).

Содержимое форм на каждом уровне зависит от конструкции элемента, методов и периодичности контроля его технического состояния, требований нормативно-технических документов, материального исполнения, сложившихся особенностей эксплуатации. Примеры форм приведены на рисунках 4-6.

В случае обнаружения дефекта, препятствующего дальнейшей эксплуатации, т.е. отмеченного как «НЕ годен» в формах «Описание и ранжирование дефектов» или «Расчет итогового значения» целесообразно предусмотреть цветовую сигнализацию – выделение ячейки оранжевым цветом. Для «годных» значений можно подсвечивать ячейки зеленым цветом. Такую же сигнализацию имеет смысл перенести и в сводную форму «Результаты контроля».

Узел	Элемент	Деталь	Зона контроля	Вид/результаты контроля						
(в соответствии со иерархической структурой)			(в соответствии с Программой диагностирования)	ВК	ИК	ЦД (МГД)	ВТК	УЗД	ТВ	МИ
ЦВД	РВД	цельно-кованный вал	наружные поверхности в доступных местах – 100 %	нет	-	-	-	-	-	-
			радиусные переходы (обод, гребни, разгрузочные отверстия, галтели дисков)	да	-	да	-	-	-	-
			тепловые канавки	да	-	да	да	-	-	-
			шейки вала	нет	-	нет	-	-	-	-
			ободы дисков с Т-образным пазом под хвостовик лопатки первой ступени	нет	-	-	-	нет	140	-
			осевой канал РВД	нет	0.06	-	нет	нет	-	-
			полотно диска первой ступени	нет	-	-	-	-	-	нет

Рисунок 3 – Пример сводной формы «Результаты контроля» для цельнокованного вала РВД

Тип дефекта	ТРЕЩИНА					
количество	единичный дефект			множественный дефект		
	да			нет		
местоположение	радиусный переход					
	ступень	обод	гребень	разгрузочные отверстия	галтель диска	иное
	1	-	-	да	-	-
длина, мм	5					
глубина, мм	1,5					
раскрытие, мм	0,3					
Фотографии дефекта	1÷3 изображения дефекта крупным планом с приложением линейки					
Ранг дефекта	годен			НЕ годен		
	нет			да		

Рисунок 4 – Пример формы «Описание и ранжирование дефекта» – трещина в радиусном переходе

Параметр	ТВЕРДОСТЬ	
Алгоритм определения итогового значения	Среднее арифметическое значение	
Зона измерения	Приложить схему	
Количество измерений	4	
измерение 1	135	
измерение 2	143	
измерение 3	146	
измерение 4	144	
Минимальное значение	135	
Максимальное значение	146	
Итоговое значение	142	
Допускаемое по НТД значение	не менее 141	
Ранг дефекта	годен	НЕ годен
	да	-

Рисунок 5 – Пример формы «Расчет итогового значения» – измерение твердости

## Заключение

Предложенная концепция построения структурированной базы данных по результатам контроля состояния металла позволяет в дальнейшем разработать унифицированную цифровую платформу в целях управления жизненным циклом паровой турбины, формализовать и автоматизировать передачу информации от момента разработки технических требований на выполнение работ до формирования итогового отчетного документа,

исключить сбор и передачу для дальнейшего анализа неполных, неадекватных, неприемлемых данных, минимизировать влияние человеческого фактора и связанные с ним ошибки.

*Представленные в статье материалы получены в рамках выполнения научно-исследовательских работ по грантам Фонда содействия инновациям № 3288ГC1/55639 от 27.11.2019 и № 4373ГC2/55639 от 01.12.2021 при технической и финансовой поддержке Фонда Сколково.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пермикин В. С., Пермикин Д. В. О ползучести валов высокотемпературных роторов паровых энергетических турбин //Дефектоскопия. – 2019. – №. 1. – С. 23-31.
2. Резинских В. Ф. Ещё раз о ресурсе энергооборудования //Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – №. 4 (7). – С. 9-13.
3. СТО 70238424.27.100.005-2008 Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования, Утв. Приказом НП «ИНВЭЛ» от 01.07.2008 № 12/5, 2008, 2008.
4. Абушик Г. В., Георгиевская Е. В., Левченко А. И., Гаврилов С. Н. Долговечность и ресурс агрегатов ТЭС, АЭС и ГЭС // Энергетик. – 1018. – № 2. – С. 18-22.
5. Георгиевская Е. В., Георгиевский Н. В. Цифровые двойники матричного типа для предиктивной аналитики технического состояния турбомашин //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2023. – №. 6. – С. 47.
6. Гладштейн В. И., Любимов А. А. Оценка ресурса высокотемпературных элементов роторов турбин путем моделирования уменьшения сплошности металла //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №. 9. – С. 52-60.
7. Гладштейн В. И., Любимов А. А. Структурные признаки исчерпания ресурса металла в зонах трещин на корпусных деталях паровых турбин из стали 15Х1М1ФЛ //Электрические станции. – 2022. – №. 8. – С. 24-32.
8. Грабовский В. П. Методика оценки остаточного ресурса валопровода турбоагрегата //Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – №. 2. – С. 98-105..
9. Аминов Р. З., Гариевский М. В. Влияние участия в регулировании частоты и мощности на ресурс паротурбинных энергоблоков //Электрические станции. – 2019. – №. 6. – С. 11-16.
10. Неменко А. В., Никитин М. М. Влияние механической обработки деталей машин на их эксплуатационные характеристики // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – №2 (364). – С. 12-17.
11. Любимов А. А., Троицкий А. И., Гладштейн В. И. Анализ состояния металла паровых турбин по факторам безопасности и надежности //Теплоэнергетика. – 2013. – №. 1. – С. 33-33.
12. Георгиевская Е. В., Гаврилов С. Н. Особенности продления срока службы паровых турбин при наработках, значительно превышающих парковый ресурс //Вісн. НТУ «ХПІ». – 2013. – С. 107-113.
13. Сказочкин А. В. и др. О состоянии энергетического машиностроения в России: возможности и пути инновационного развития //Управление наукой: теория и практика. – 2022. – Т. 4. – №. 4. – С. 135-150.

**Георгиевская Евгения Викторовна**  
ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»  
Кандидат физико-математических наук  
Директор по науке  
Адрес: 197022, Санкт-Петербург, наб. реки Карповки д. 5 лит. Я  
Тел. +7(921)971-64-43  
E-mail: sciencedir@cdti.ru

**Георгиевский Ростислав Николаевич**  
ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»  
Руководитель проекта  
Адрес: 197022, Санкт-Петербург, наб. реки Карповки д. 5 лит. Я  
Тел. +7(921)316-61-01  
E-mail: rngeorgievskii@cdti.ru

**Георгиевский Николай Владимирович**  
ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций»  
Кандидат технических наук  
Генеральный директор  
Адрес: 197022, Санкт-Петербург, наб. реки Карповки д. 5 лит. Я  
Тел. +7(921)971-64-43  
E-mail: genidir@cdti.ru

GEORGIEVSKAIA E.V., GEORGIEVSKY R.N., GEORGIEVSKY N.V.

## STRUCTURING DATABASE FOR METAL CONDITION MONITORING OF POWER EQUIPMENT

**Abstract.** *High standards of reliability and safety in the power industry force to pay increased attention to life cycle management of power equipment, especially for equipment operated beyond its design life. One of the components of an effective equipment life cycle management system is a database for metal condition monitoring of life-determining units, containing clean digital data in a structured form. Currently, such a database does not exist for the vast majority of equipment units. It leads to errors in predicting the technical condition of the equipment and incorrect management decisions regarding the technical impact on the equipment. The article describes the approach and methodological basis*

*for building a structured database on the results of metal condition monitoring using a large steam turbine as an example. The database can be further integrated into a unified digital platform for to life cycle management of power equipment.*

**Keywords:** *steam turbine, life cycle management, database, metal condition monitoring.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Permikin V. S., Permikin D. V. O polzuchesti valov vysokotemperaturnykh rotorov parovykh energeticheskikh turbin //Defektoskopiya. – 2019. – №. 1. – S. 23-31.
2. Rezinskiy V. F. Eshchyо raz o resurse energooborudovaniya //Nadezhnost i bezopasnost energetiki. – 2017. – №. 4 (7). – S. 9-13.
3. STO 70238424.27.100.005-2008 Osnovnye elementy kotlov, turbin i truboprovodov TES. Kontrol sostoyaniya metalla. Normy i trebovaniya, Utv. Prikazom NP «INVEL» ot 01.07.2008 № 12/5, 2008, 2008.
4. Abushik G. V., Georgievskaya E. V., Levchenko A. I., Gavrilov S. N. Dolgovechnost i resurs agregatov TES, AES i GES // Energetik. – 2018. – № 2. – S. 18-22.
5. Georgievskaya E. V., Georgievskiy N. V. Cifrovye dvojniki matrichnogo tipa dlya prediktivnoy analitiki tekhnicheskogo sostoyaniya turbomashin //Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2023. – №. 6. – S. 47.
6. Gladstejn V. I., Lyubimov A. A. Ocenka resursa vysokotemperaturnykh elementov rotorov turbin putem modelirovaniya umensheniya sploshnosti metalla //Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2019. – T. 85. – №. 9. – S. 52-60.
7. Gladstejn V. I., Lyubimov A. A. Strukturnye priznaki ischerpaniya resursa metalla v zonah treshchin na korpusnykh detal'yah parovykh turbin iz stali 15H1M1FL //Elektricheskie stancii. – 2022. – №. 8. – S. 24-32.
8. Grabovskiy V. P. Metodika ocenki ostatochnogo resursa valoprovoda turboagregata //Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika. – 2019. – T. 62. – №. 2. – S. 98-105..
9. Aminov R. Z., Garievskiy M. V. Vliyanie uchastiya v regulirovanii chastoty i moshchnosti na resurs paroturbinnyykh energoblokov //Elektricheskie stancii. – 2019. – №. 6. – S. 11-16.
10. Nemenko A. V., Nikitin M. M. Vliyanie mekhanicheskoy obrabotki detalej mashin na ih ekspluatatsionnye harakteristiki // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2024. – №2 (364). – S. 12-17.
11. Lyubimov A. A., Troickiy A. I., Gladstejn V. I. Analiz sostoyaniya metalla parovykh turbin po faktoram bezopasnosti i nadezhnosti //Teploenergetika. – 2013. – №. 1. – S. 33-33.
12. Georgievskaya E. V., Gavrilov S. N. Osobennosti prodleniya sroka sluzhby parovykh turbin pri narabotkah, znachitelno prevyshayushchih parkovyy resurs //Visn. NTU «HPI. – 2013. – S. 107-113.
13. Skazochkin A. V. i dr. O sostoyanii energeticheskogo mashinostroeniya v rossii: vozmozhnosti i puti innovatsionnogo razvitiya //Upravlenie naukoj: teoriya i praktika. – 2022. – T. 4. – №. 4. – S. 135-150.

**Georgievskaya Evgenia Viktorovna**  
Center for design and technological  
innovation» LLC  
Ph.D. (Physical&Matemtical  
Sciences)  
Director for Science  
197022, Saint-Petersburg  
Nab. reki Karpovki, d. 5, str. YA  
Tel. +7(921)971-64-43  
E-mail: sciencedir@cdti.ru

**Georgievsky Rostislav Nikolaevich**  
Center for design and technological  
innovation» LLC  
Project Manager  
197376, Saint-Petersburg  
Nab. reki Karpovki, d. 5, str. YA  
Tel. +7(921)316-61-01  
E-mail: rngorgievskii@cdti.ru

**Georgievsky Nikolay Vladimirovich**  
Center for design and technological  
innovation» LLC  
Ph.D. (Technical Sciences)  
General Director  
Ph.D. (Technical Sciences)  
197376, Saint-Petersburg  
Nab. reki Karpovki, d. 5, str. YA  
Tel. +7(921)971-64-43  
E-mail: gendir@cdti.ru

© Георгиевская Е.В., Георгиевский Р.Н., Георгиевский Н.В., 2025

КВАС Е.С., КУЗЬМЕНКО В.П., СОЛЁНЫЙ С.В.

## АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ЖИДКОСТЕЙ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ РОЗЛИВА

**Аннотация.** В данной работе предложен метод построения алгоритма управления качеством и стабилизации параметров потока жидкостей в роботизированных системах розлива на основе уравнений в частных производных. Модель учитывает динамические изменения объёмного расхода и концентрации жидкости вдоль производственной линии под воздействием внешних возмущений. Применение управляющих воздействий позволяет компенсировать возмущения и стабилизировать параметры системы, обеспечивая её возврат к номинальному состоянию. Результаты численного моделирования подтверждают эффективность разработанного алгоритма в стабилизации производственного процесса.

**Ключевые слова:** управление качеством, стабилизация параметров, поток жидкостей, роботизированные системы розлива, уравнения в частных производных, внешние возмущения, моделирование.

### Введение

Фактор времени играет решающую роль в планировании работы производственных линий и оперативном контроле их параметров потока. В частности, для роботизированных систем розлива, где точность и стабильность процесса имеют критическое значение, необходимо уделять особое внимание обеспечению непрерывности и ритмичности обработки продукции по технологическому маршруту. В этом контексте математические методы планирования и оперативного контроля параметров потока в производственных линиях приобретают исключительную важность [1, 2, 3].

Основная задача планирования и контроля заключается в обеспечении устойчивого состояния параметров потока жидкостей на всех этапах производственного процесса. Особенно остро этот вопрос стоит в современных производственных системах, где каждая линия может включать множество технологических операций, а взаимосвязь между ними требует детального анализа и оптимизации. В частности, роботизированные линии розлива часто включают десятки операций, каждая из которых требует тщательного контроля и стабилизации параметров потока, таких как скорость подачи, объем дозирования и качество розлива [1, 2].

Исследуемый объект – роботизированная линия розлива, представляющая собой систему последовательных технологических операций, в ходе которых осуществляется дозированная подача и распределение жидкостей. Важнейшей характеристикой таких систем является необходимость поддержания стабильности параметров потока, несмотря на возможные внешние возмущения. Это требует разработки алгоритмов, которые обеспечат асимптотическую устойчивость параметров потока при минимальных затратах технологических ресурсов.

При разработке модели для роботизированных линий розлива особое внимание уделяется последовательной структуре технологических операций, что позволяет упростить построение алгоритмов стабилизации параметров потока. Такой подход не только облегчает решение поставленной задачи, но и позволяет применять полученные результаты к более сложным и разветвленным производственным системам.

Цель работы заключается в разработке метода построения алгоритма стабилизации параметров потока жидкостей в роботизированных системах розлива на основе уравнений в частных производных, обеспечивающего асимптотическую устойчивость состояния параметров потока при воздействии внешних возмущений и минимизации отклонений объёмного расхода и концентрации жидкости.

### Основная часть

Для синтеза оптимальных систем управления параметрами потока на производственных линиях используется несколько классов моделей. Рассмотрим основные из них и их применимость к задачам стабилизации и управления потоками на роботизированных линиях розлива жидкостей. Модели функции очищения и модели теории очередей

применяются, когда необходимо контролировать входные и выходные параметры производственной линии. Эти модели позволяют определить взаимосвязь между входными и выходными параметрами, используя приближенные или точные аналитические выражения. Эти выражения учитывают распределенное состояние параметров вдоль производственной линии с определенной точностью. Однако стоит отметить, что данные модели не предоставляют контроля над состоянием параметров потока вдоль всей производственной линии, что ограничивает их применимость в сложных системах, где требуется более детализированное управление процессами. Примеры эффективного применения модели функции очищения можно найти в работах [3, 4], но такие случаи встречаются довольно редко.

Модели дискретных событий позволяют достаточно точно моделировать процессы обработки продуктов на технологических операциях производственной линии. Эти модели широко используются для создания систем управления параметрами потока на производственных линиях. Однако их применение для проектирования эффективных систем управления имеет существенные ограничения. Основным недостатком является высокая вычислительная сложность при построении многооперационных моделей производственных линий с большими партиями продукции. В таких случаях время вычисления параметров модели может превышать время, отведенное на принятие решений по формированию управляющих воздействий, что делает эти модели менее подходящими для задач оперативного управления [5].

Для описания производственных линий, особенно в контексте роботизированных систем розлива, наиболее подходящими являются модели динамики жидкости, модели системной динамики и PDE-модели (уравнения в частных производных).

Для роботизированных линий розлива жидкостей характерны динамические изменения параметров потока, таких как объёмный расход и концентрация жидкости. Эти параметры важны для обеспечения точности дозирования и равномерности розлива, что напрямую влияет на качество конечного продукта. Описание этих процессов с помощью уравнений в частных производных (PDE) является оправданным подходом, поскольку параметры потока жидкости, такие как объёмный расход и концентрация, изменяются не только во времени, но и вдоль производственной линии. Это требует учета как временных, так и пространственных переменных. Помимо этого, в реальных производственных условиях параметры потока подвержены различным возмущениям, таким как колебания давления, температуры или состава жидкости. Эти возмущения могут быть учтены в модели через внешние функции возмущений. Для поддержания стабильности процесса розлива и обеспечения качества продукции необходимы управляющие воздействия, которые можно интегрировать в модель в виде дополнительных уравнений, описывающих динамику этих воздействий [6,7,8].

Примеры успешного применения PDE-моделей для управления параметрами потока в роботизированных системах розлива представлены в ряде исследований. Например, в [8, 9] описаны методы, позволяющие использовать уравнения в частных производных для моделирования динамики потоков жидкостей в производственных процессах. В частности, предложены подходы, где PDE-модель применяется для описания пространственно-временных изменений параметров потока жидкости на конвейерных линиях, что позволяет учитывать изменения объёмного расхода и концентрации как на входе, так и на выходе из системы, рассматривается возможность интеграции PDE-моделей с системной динамикой, что значительно расширяет их применимость для сложных производственных систем, таких как роботизированные линии розлива, где требуется точное управление качеством продукции и стабилизация параметров потока в условиях изменяющихся внешних условий [10, 11].

Несмотря на то, что описанные выше модели и подходы (модели функции очищения, теория очередей, модели дискретных событий, модели динамики жидкости и PDE-модели) представляют собой мощные инструменты для управления производственными процессами, они имеют свои ограничения, особенно в контексте роботизированных систем розлива жидкостей. Например, модели динамики жидкости и системной динамики эффективны для описания производственных линий с ограниченным числом технологических операций. Однако их точность и эффективность снижается по мере увеличения числа операций и сложности процесса. В условиях роботизированных линий розлива, где количество операций и их взаимосвязи могут быть значительными, такие модели могут не обеспечить достаточной

точности и управляемости. Поэтому PDE-модели представляют собой наиболее перспективный инструмент для описания сложных многопараметрических процессов в производственных системах, таких как роботизированные линии розлива. Однако, даже эти модели требуют дальнейшего развития, особенно в контексте интеграции с реальными системами управления. Это связано с необходимостью учета нелинейных и нестационарных процессов, а также адаптации к изменяющимся внешним условиям и параметрам системы. Для достижения этого необходимы новые алгоритмы и методы, которые обеспечат стабильность и высокое качество управления при минимальных затратах ресурсов.

Исходя из описанных факторов, временные изменения объёмного расхода  $q(t, x)$  жидкости в зависимости от скорости потока  $v(t, x)$  и внешних возмущений  $F(t, x)$  можно записать уравнение для объёмного расхода жидкости следующим образом:

$$\partial q(t, x) / \partial t + \partial / \partial x (v(t, x) \cdot q(t, x)) = F(t, x),$$

где  $q(t, x)$  – объёмный расход жидкости в точке  $x$  на линии в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с;  
 $v(t, x)$  – скорость потока жидкости в точке  $x$  на линии в момент времени  $t$ , м/с;  
 $t$  – время, с;  
 $x$  – пространственная координата вдоль линии розлива, м;  
 $F(t, x)$  – внешние возмущения или изменения в расходе жидкости, м<sup>3</sup>/с<sup>2</sup>.  
 Уравнение для концентрации жидкости:

$$\partial c(t, x) / \partial t + \partial / \partial x (v(t, x) \cdot c(t, x)) = G(t, x),$$

где  $c(t, x)$  – концентрация или состав жидкости в точке  $x$  на линии в момент времени  $t$ , доли единицы;  
 $G(t, x)$  – внешние возмущения или изменения в концентрации жидкости, доли единицы/с.

В реальных условиях эксплуатации роботизированных линий розлива жидкостей параметры системы, такие как объёмный расход и концентрация, могут отклоняться от своих номинальных значений из-за различных возмущений. Эти возмущения могут быть вызваны внешними факторами, такими как колебания давления в системе, изменения температуры жидкости или вариации состава входящей смеси. Для описания этих отклонений введем понятие возмущений, которые характеризуют отклонения фактических параметров от их идеальных значений [5, 7].

Возмущение объёмного расхода жидкости можно записать следующим образом:

$$\delta q(t, x) = q(t, x) - q^*(t, x),$$

где  $\delta q(t, x)$  – возмущение объёмного расхода жидкости в точке  $x$  на линии в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с;

$q^*(t, x)$  – номинальный (идеальный) объёмный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.

Аналогично, возмущение концентрации жидкости можно описать следующим уравнением:

$$\delta c(t, x) = c(t, x) - c^*(t, x),$$

где  $\delta c(t, x)$  – возмущение концентрации жидкости в точке  $x$  на линии в момент времени  $t$ , доли единицы;

$c^*(t, x)$  – номинальная (идеальная) концентрация жидкости, доли единицы.

Описанные уравнения позволяют количественно описать отклонения от идеального состояния системы. Наличие таких отклонений требует разработки соответствующих управляющих воздействий, которые бы компенсировали эти возмущения и возвращали систему к её номинальным параметрам.

Для стабилизации параметров системы и компенсации возмущений вводятся управляющие воздействия, которые определяются функциями  $u_q(t, \delta q, \delta c)$  и  $u_c(t, \delta q, \delta c)$ .

Управляющее воздействие на объёмный расход:

$$u_q(t) = -k_q \cdot \overline{\delta q}(t),$$

где  $k_q$  – коэффициент усиления для объёмного расхода, с<sup>-1</sup>, определяет, насколько сильно система реагирует на обнаруженное возмущение, его значение выбирается на этапе настройки системы управления и может быть определено с помощью методов оптимизации или экспериментально;

$\overline{\delta q}(t)$  – среднее значение возмущения объёмного расхода по всей длине линии в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с, вычисляется как:

$$\overline{\delta q}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \delta q(t, x) dx,$$

где  $L$  – длина линии розлива, м.

Управляющее воздействие на концентрацию:

$$u_c(t) = -k_c \cdot \overline{\delta c}(t),$$

где  $k_c$  – коэффициент усиления для концентрации,  $c^{-1}$ . Подобно  $k_q$  этот коэффициент настраивается для эффективной компенсации возмущений концентрации.

$\overline{\delta c}(t)$  – среднее значение возмущения концентрации по всей длине линии в момент времени  $t$ , доли единицы, вычисляется как:

$$\overline{\delta q}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \delta c(t, x) dx.$$

Средние значения возмущений используются для упрощения системы управления, позволяя принимать решения на основе интегральных характеристик, а не локальных отклонений. Коэффициенты усиления определяют скорость реакции системы на возмущения. Их значения должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить стабильность системы и избежать перенастройки или колебаний.

Эти воздействия должны быть такими, чтобы в случае отсутствия возмущений (т.е. когда  $\delta q = 0$  и  $\delta c = 0$  система не предпринимала никаких корректирующих действий, что можно выразить следующими условиями:

$$u_q(t, 0, 0) = 0, u_c(t, 0, 0) = 0.$$

В реальных условиях такие управляющие воздействия могут включать изменения в скорости подачи жидкости, регулирование давления, или корректировку состава жидкости, что позволяет компенсировать изменения и стабилизировать параметры системы [11].

Балансовые уравнения, представленные выше, описывают состояние параметров потока на многооперационной производственной линии. В контексте роботизированной системы розлива жидкостей, основной режим работы такой линии должен быть синхронизированным, при котором производительность каждого технологического оборудования на всех операциях одинакова.

Для описания состояния производственной линии предложим следующие балансовые уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial q(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha(x)q(t, x))}{\partial x} &= F(t, x) + u_q(t, x), \\ \frac{\partial c(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial c(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta(x)c(t, x))}{\partial x} &= G(t, x) + u_c(t, x), \end{aligned}$$

где  $\alpha(x)$  и  $\beta(x)$  – функции пространственного распределения, описывающие влияние неравномерности оборудования на расход и концентрацию соответственно.

Для анализа малых возмущений системы можно линеаризовать балансовые уравнения, представив их в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta q(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \delta q(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha(x) \cdot \delta q(t, x))}{\partial x} &= u_q(t, x), \\ \frac{\partial \delta c(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \delta c(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta(x) \cdot \delta c(t, x))}{\partial x} &= u_c(t, x). \end{aligned}$$

Для упрощения анализа предположим, что коэффициенты  $\alpha(x)$  и  $\beta(x)$  зависят только от пространственной координаты  $x$  и меняются медленнее, чем основные параметры потока:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha(x)}{\partial t} &\approx 0, \\ \frac{\partial \beta(x)}{\partial t} &\approx 0. \end{aligned}$$

Данные допущения позволяют сосредоточиться больше на анализе пространственных изменений параметров потока и их влияния на общую динамику системы.

Для стабилизации параметров потока введем описанные управляющие воздействия в линеаризованные уравнения баланса:

$$\frac{\partial \delta q(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \delta q(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha(x) \cdot \delta q(t, x))}{\partial x} + k_q(x) \cdot \delta q(t, x) = 0,$$

$$\frac{\partial c(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial c(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta(x) \cdot \delta c(t, x))}{\partial x} + k_c(x) \cdot \delta c(t, x) = 0.$$

Для оценки эффективности управления введем интегральный критерий качества, который будет учитывать как отклонения параметров, так и затраты на управляющие воздействия:

$$J = \int_0^\infty \int_0^L (\alpha(x) \cdot \delta q^2(t, x) + \beta(x) \cdot u_q^2(t, x) + \gamma(x) \cdot \delta c^2(t, x) + \delta(x) \cdot u_c^2(t, x)) dx dt,$$

где  $\alpha(x)$ ,  $\beta(x)$ ,  $\gamma(x)$ ,  $\delta(x)$  – весовые коэффициенты, зависящие от пространственной координаты.

Задача стабилизации заключается в нахождении таких функций  $u_q^*(t, x)$  и  $u_c^*(t, x)$ , которые минимизируют критерий качества  $J$ . Решение этой задачи приводит к оптимальным управляющим воздействиям:

$$u_q^*(t, x) = -\frac{\alpha(x)}{\beta(x)} \cdot \delta q(t, x),$$

$$u_c^*(t, x) = -\frac{\gamma(x)}{\delta(x)} \cdot \delta c(t, x).$$

Подставляя эти управляющие воздействия в линеаризованные уравнения, получается окончательная система уравнений для анализа и синтеза алгоритма управления.

Корректировка, координация и утверждение производственного плана требуют точной информации о распределении компонентов по технологическим операциям вдоль всей линии. Проблема тактического планирования производства тесно связана с размещением резервов запасов. В контексте роботизированных систем розлива жидкостей, где важна стабильность потока и качество продукции, особенно критично правильно распределять запасы.

Для решения задачи тактического планирования на уровне отдельных элементов производственной линии, состоящей из двух технологических операций, предлагается использовать методы линейного программирования. Применение модели жидкости для тактического планирования позволяет оптимизировать объем страховых запасов для обеспечения нормативного функционирования линии. Это особенно важно в многооперационных линиях, где отклонения параметров потока могут быть компенсированы через оптимально размещенные запасы.

Функция Ляпунова для системы с учётом объёмного расхода и концентрации может быть записана в следующей форме:

$$V^0 = \int_0^L (\lambda_q \cdot \delta q^2(t, x) + \lambda_c \cdot \delta c^2(t, x)) dx,$$

где  $\lambda_q$  и  $\lambda_c$  – коэффициенты, определяющие вклад возмущений объёмного расхода и концентрации в общую функцию Ляпунова. Это позволяет учесть все возможные воздействия и изменения в системе.

Функция Ляпунова минимизируется с учетом времени и пространственных координат, что приводит к следующим уравнениям для стабилизации:

$$\frac{\partial V^0}{\partial t} + \sum \left( \frac{\partial \delta q}{\partial x} \cdot k_q(x) \cdot \delta q(t, x) + \frac{\partial \delta c}{\partial x} \cdot k_c(x) \cdot \delta c(t, x) \right) = 0.$$

Гамильтониан для системы записывается в виде:

$$B[V^0] = \frac{\partial V^0}{\partial u_q} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial V^0}{\partial \delta q_n} \frac{\partial \delta q_n}{\partial u_q} + \frac{\partial V^0}{\partial u_c} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\partial V^0}{\partial \delta c_j} \frac{\partial \delta c_j}{\partial u_c}.$$

Минимизация гамильтониана для нахождения оптимального управления:

$$\lambda_q \cdot \delta q + \lambda_c \cdot \delta c + \beta \cdot u_q = 0,$$

$$\lambda_c \cdot \delta c + \delta \cdot u_c = 0.$$

Используем систему уравнений для оценки влияния управляющих воздействий на стабилизацию параметров потока. При использовании оптимального управления  $u_q^*(t, x)$  и  $u_c^*(t, x)$ , найденных ранее, уравнения для объёмного расхода и концентрации жидкости примут следующий вид:

$$\frac{\partial \delta q(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial q(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha(x) \cdot \delta q(t, x))}{\partial x} + \frac{\alpha(x)}{\beta(x)} \cdot \delta q(t, x) = 0,$$

$$\frac{\partial c(t, x)}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial c(t, x)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta(x) \cdot \delta c(t, x))}{\partial x} + \frac{\gamma(x)}{\delta(x)} \cdot \delta c(t, x) = 0.$$

Эти уравнения показывают, что возмущения объёмного расхода  $\delta q(t, x)$  и концентрации  $\delta c(t, x)$  уменьшаются экспоненциально по времени при условии, что коэффициенты  $\alpha(x)/\beta(x)$  и  $\gamma(x)/\delta(x)$  положительные и имеют достаточно большие значения.

Конкретно, для объёмного расхода решение имеет следующий вид:

$$\delta q(t, x) \sim \exp\left(-\frac{\alpha(x)}{\beta(x)} \cdot t\right),$$

аналогично для концентрации:

$$\delta c(t, x) \sim \exp\left(-\frac{\gamma(x)}{\delta(x)} \cdot t\right).$$

Таким образом, отклонения объёмного расхода и концентрации жидкости уменьшаются со временем, что обеспечивает стабилизацию параметров потока на роботизированной линии розлива жидкостей. При этом характерное время затухания возмущений  $t_d$  обратно пропорционально  $\alpha(x)/\beta(x)$  и  $\gamma(x)/\delta(x)$ :

$$t_d^q = \frac{\beta(x)}{\alpha(x)},$$

$$t_d^c = \frac{\delta(x)}{\gamma(x)}.$$

Увеличение значений коэффициентов  $\alpha(x)$  и  $\gamma(x)$  ведет к ускорению процесса стабилизации и, соответственно, уменьшению характерного времени  $t_d$ .

Использование оптимального управления на основе предложенной модели позволяет эффективно стабилизировать параметры потока жидкости на производственной линии, минимизируя отклонения объёмного расхода и концентрации. Это гарантирует, что производственный процесс будет стабильным и предсказуемым, с минимальными затратами на управление и высокими качественными характеристиками конечного продукта.

### Результаты моделирования разработанной системы

Для анализа поведения роботизированной линии розлива жидкости была проведена симуляция на основе уравнений потока с учётом внешних возмущений и управляющих воздействий. Основными параметрами симуляции являются объёмный расход жидкости и её концентрация, зависящие от длины линии и времени.

Основной задачей моделирования было показать, как внешние возмущения влияют на параметры потока, а также как управляющие воздействия могут стабилизировать эти параметры, возвращая их к номинальным значениям.

Симуляция проводилась на временном интервале 10 секунд, причём параметры потока изменялись вдоль линии длиной 10 метров. Для моделирования использовались функции, описанные в предыдущем разделе. Здесь коэффициенты  $k_q(x)$  и  $k_c(x)$  представляют собой пространственно зависимые коэффициенты управления, которые позволяют системе адаптироваться к изменениям и стабилизировать параметры потока.

В таблице 1 представлены основные параметры, использованные в процессе моделирования динамики объёмного расхода и концентрации жидкости в роботизированной системе розлива. Параметры включают как пространственные характеристики системы (длина линии), так и временные (интервал моделирования). Также в таблице указаны номинальные значения объёмного расхода и концентрации, которые являются целевыми показателями для системы. В процессе моделирования учитывались пространственные и временные зависимости объёмного расхода и концентрации жидкости, которые изменялись под воздействием внешних возмущений. Важным аспектом исследования было введение управляющих воздействий, направленных на стабилизацию параметров системы, что позволило компенсировать внешние возмущения и вернуть параметры к их номинальным значениям.

Таблица 1 – Начальные параметры моделирования для роботизированной системы розлива

№	Параметр	Описание
1	$L = 10 \text{ м}$	длина роботизированной линии розлива
2	$V = 1 \text{ м/с}$	скорость потока жидкости
3	$q_0 = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$	номинальный объёмный расход жидкости
4	$c_0 = 0,5$ долей единицы	номинальная концентрация жидкости
5	$k_q(x) = 0,7 + 0,1x, \text{ с}^{-1}$	коэффициент управляющего воздействия на объёмный расход
6	$k_c(x) = 0,5 + 0,05x, \text{ с}^{-1}$	коэффициент управляющего воздействия на концентрацию
7	$t = 10 - 120 \text{ с}$	временной интервал моделирования
8	Возмущение $F(t,x) = 0,05\sin(2\pi t/3)\exp(-x/L), \text{ м}^3/\text{с}^2$	внешнее возмущение объёмного расхода
9	Возмущение $G(t,x) = 0,03\cos(2\pi t/4)\exp(-x/L), \text{ доли единицы /с}$	внешнее возмущение концентрации

Такая математическая форма возмущения объёмного расхода, как указано в п.8 таблицы 1, выбрана для моделирования периодических колебаний в системе подачи жидкости, которые могут быть вызваны, например, пульсацией насосов или изменением давления в трубопроводах, здесь амплитуда возмущения и частота соответствуют реалистичным сценариям, когда система испытывает колебания со средней периодичностью. Экспоненциальное затухание вдоль линии  $\exp(-x/L)$ , учитывает постепенное снижение влияния возмущения по мере удаления от его источника, что также характерно для реальных производственных систем. Аналогично для возмущения концентрации, которое может быть вызвано колебаниями концентрации сырья на входе или отклонениями в процессе смешивания. Выбор таких типов возмущений допустим, поскольку они моделируют типичные ситуации, с которыми сталкиваются производственные системы, включая флуктуации давления, изменения состава жидкостей и пульсации потока. Эти возмущения обеспечивают адекватную проверку устойчивости предложенного алгоритма управления и его способности стабилизировать параметры потока при наличии реальных производственных отклонений.

На рисунке 1 представлены результаты моделирования динамики объёмного расхода и концентрации жидкости вдоль линии розлива с учётом внешних возмущений и применённых управляющих воздействий.

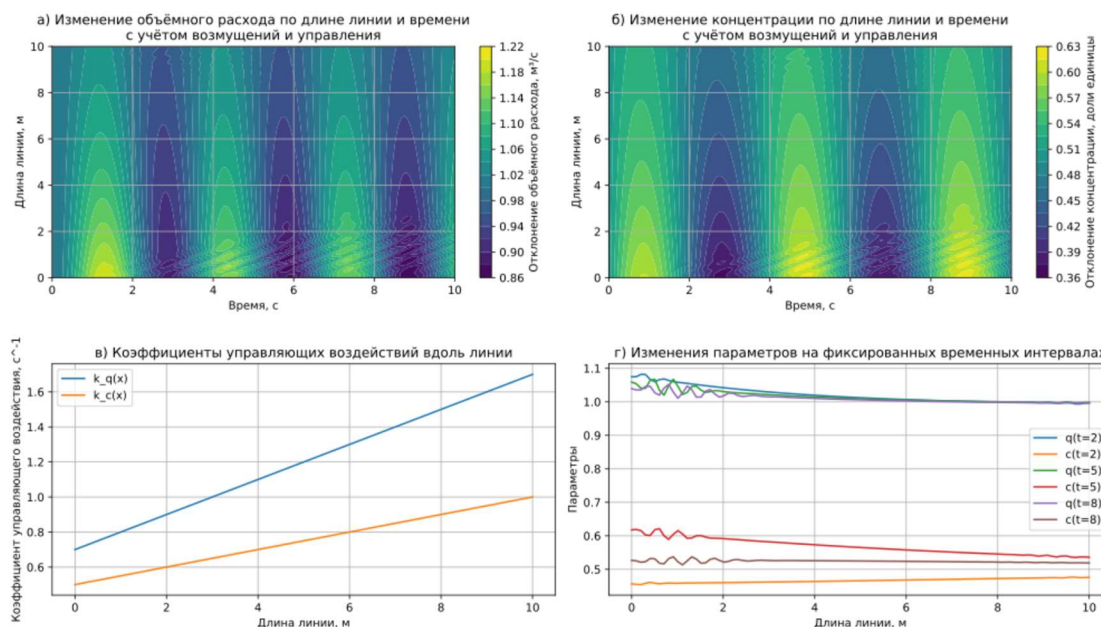
Левая часть рисунка 1 (а) показывает изменение объёмного расхода жидкости по длине линии и во времени. В начальные моменты времени и в начале линии заметны значительные отклонения от номинального значения  $q_0 = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . Это отклонение связано с внешними возмущениями, которые влияют на систему. Однако по мере продвижения по линии, благодаря воздействию системы управления, объёмный расход постепенно возвращается к номинальному значению. Наблюдаемое поведение демонстрирует, что управляющее воздействие эффективно компенсирует влияние возмущений, позволяя стабилизировать систему и минимизировать отклонения объёмного расхода.

Правая часть рисунка 1 (б) иллюстрирует изменение концентрации жидкости вдоль линии и во времени. Как и в случае с объёмным расходом, начальные возмущения приводят к отклонению концентрации от номинального значения  $c_0 = 0,5$ . Однако благодаря введённым управляющим воздействиям, система стабилизирует концентрацию, постепенно возвращая её к номинальному значению. Стоит отметить, что влияние возмущений на концентрацию более выражено на начальных участках линии, однако уже к середине линии наблюдается заметное снижение отклонений, что свидетельствует о корректно настроенной системе управления.

Нижняя левая часть рисунка 1 (в) отображает распределение коэффициентов управляющих воздействий  $k_q(x)$  и  $k_c(x)$  вдоль длины линии. Видно, что значения коэффициентов возрастают по мере увеличения расстояния вдоль линии. Это объясняется необходимостью усиления управляющего воздействия на поздних этапах линии, когда система уже подверглась воздействию возмущений и требует большего усилия для стабилизации параметров.

В нижней правой части рисунка 1 (г) показаны изменения объёмного расхода и концентрации на фиксированных временных интервалах (2, 5 и 8 секунд). Графики демонстрируют, что с течением времени отклонения от номинальных значений уменьшаются, что свидетельствует о том, что система управления эффективно компенсирует внешние возмущения. К 8 секунде практически все параметры стабилизируются около своих номинальных значений, что подтверждает адекватность выбранных алгоритмов управления и моделирования.

Таким образом, результаты моделирования демонстрируют, что предложенная модель и алгоритмы управления позволяют эффективно компенсировать внешние возмущения и поддерживать стабильные параметры в роботизированной системе розлива жидкости. Представленные графики подтверждают, что система стабилизации работает корректно, что особенно важно для обеспечения высокого качества конечного продукта.



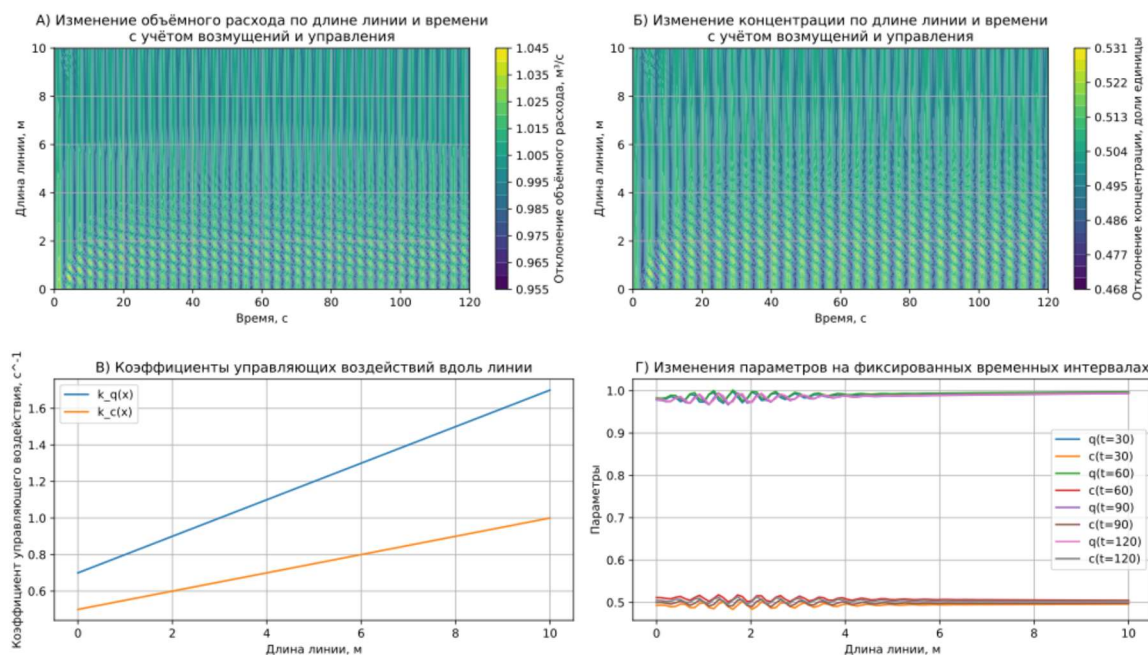
**Рисунок 1 – Результаты моделирования динамики объёмного расхода и концентрации жидкости вдоль линии розлива с учётом внешних возмущений и управляющих воздействий на временном интервале 10 секунд**

На рисунке 2 представлены результаты моделирования динамики объёмного расхода и концентрации жидкости в течение 120 секунд вдоль линии розлива с учётом внешних возмущений и управляющих воздействий.

График А) рисунка 2 по сравнению с аналогичным графиком на рисунке 1 показывает, что при увеличении времени моделирования до 120 секунд наблюдается более выраженное затухание колебаний объёмного расхода. Если на графике для 10 секунд колебания объёмного расхода остаются заметными по всей длине линии, то на графике для 120 секунд амплитуда этих колебаний существенно снижается, и система постепенно возвращается к своему номинальному состоянию. Это подтверждает, что применяемые управляющие воздействия со временем успешно компенсируют возмущения, приводя систему к стабильности.

График Б) рисунка 2 также показывает улучшение стабилизации концентрации по сравнению с 10-секундным моделированием. В течение первых 10 секунд система ещё не успевает полностью стабилизироваться, и возмущения продолжают оказывать влияние на концентрацию вдоль всей линии. Однако на графике для 120 секунд видно, что к концу

моделирования колебания концентрации практически исчезают, что указывает на полную компенсацию возмущений и достижение стабильного состояния.



**Рисунок 2 – Результаты моделирования динамики объёмного расхода и концентрации жидкости вдоль линии розлива с учётом внешних возмущений и управляющих воздействий на временном интервале 120 секунд**

График В) рисунка 2 с коэффициентами управляющих воздействий остаётся неизменным в течение всего процесса моделирования, поскольку коэффициенты  $k_q(x)$  и  $k_c(x)$  определяются пространственной координатой и не зависят от времени. Это значит, что рост интенсивности управляющих воздействий с удалением от начала линии сохраняется в обоих моделированиях, обеспечивая надёжную компенсацию возмущений на дальних участках линии.

График Г) рисунка 2 демонстрирует важные отличия от моделирования на 10 секунд. В то время как на графике для 10 секунд отклонения от номинальных значений оставались значительными, при моделировании на 120 секунд виден явный процесс стабилизации. Амплитуды колебаний для обоих параметров – объёмного расхода и концентрации – значительно снижаются, особенно после 60 секунд. Это наглядно демонстрирует, что система требует больше времени для полной стабилизации, но, благодаря управляющим воздействиям, она способна возвращаться к номинальным значениям даже после значительных возмущений.

### Заключение

Предложен метод построения алгоритма для стабилизации параметров потока жидкостей в роботизированных системах розлива. Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые предложен алгоритм стабилизации параметров потока, учитывающий как объёмный расход, так и концентрацию жидкости в условиях воздействия внешних возмущений. Разработанный алгоритм стабилизации позволяет обеспечить асимптотическое затухание возникающих возмущений при условии, что процесс стабилизации осуществляется в соответствии с заданным критерием качества. Это позволяет гарантировать достижение требуемых показателей производительности и качества продукции при минимальных затратах технологических ресурсов.

Практическая значимость разработанного подхода заключается в его применении для проектирования высокоэффективных систем управления качеством в роботизированных линиях розлива жидкостей. Применение предложенного алгоритма позволяет предотвратить простоев оборудования, вызванных нарушениями параметров потока, такими как отклонения объёмного расхода и концентрации жидкости от их номинальных значений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием предложенного метода для стабилизации не только параметров потока, но и производительности технологических операций на линии розлива. В частности, целесообразно исследование возможности интеграции методов адаптивного управления и машинного обучения для улучшения устойчивости системы к сложным и динамическим возмущениям, что позволит повысить эффективность работы роботизированных систем в реальных производственных условиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов, А. С. (2010). Методология автоматизированного статистического контроля массовых производств. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, (2-1), 173-186.
2. Dutta, P., & Kumar, A. (2020). Modelling of Liquid Flow control system Using Optimized Genetic Algorithm. *Statistics, Optimization & Information Computing*. <https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-618>.
3. Шкапов, П. М. (2010). Устойчивость системы трубопровод нагруженный агрегат с учетом неоднородности свойств потока. Вестник Тамбовского государственного технического университета, 16 (4), 831-836.
4. Forestier-Coste, L., Göttlich, S., & Herty, M. (2015). Data-Fitted Second-Order Macroscopic Production Models. *SIAM J. Appl. Math.*, 75, 999-1014. <https://doi.org/10.1137/140989832>.
5. Sun, Y., Zhu, T., Zhang, L., & Denno, P. (2021). Parameter Identification for Bernoulli Serial Production Line Model. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18, 2115-2127. <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3035291>.
6. Ahuja, S., & Rowley, C. (2009). Feedback control of unstable steady states of flow past a flat plate using reduced-order estimators. *Journal of Fluid Mechanics*, 645, 447 - 478. <https://doi.org/10.1017/S0022112009992655>.
7. Pihnastyi, Oleh and Kozhevnikov, George, Распределенная динамическая PDE-модель программного управления загрузкой технологического оборудования производственной линии (Distributed Dynamic PDE-Model of Program Control by Utilization of the Technological Equipment of Production Line) (February 1, 2019). Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Наука и прогресс транспорта. - Днепропетровск: ДНУЖД. - 2019. - № 1(79). - С. 81-93. – DOI: 10.15802/stp2019/159489, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3371237>
8. Пигнастый О.М. Обзор моделей управляемых производственных процессов поточных линий производственных систем // Экономика. Информатика. 2015. №7 (204).
9. Pihnastyi, O., Yemelianova, D., & Lysytsia, D. (2020). Using PDE model and system dynamics model for describing multi-operation production lines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(4 (106), 54–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210750>
10. Hoher, S., Schindler, P., Göttlich, S., Schleper, V., & Röck, S. (2012). System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems., 316-321. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4_52).
11. Федосенков Д. Б., Симилова А. А., Федосенков Б. А. Модальное управление процессами дозирования в среде пространства состояний и вейвлет-преобразований. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, (4), 46-58. 2019 г.

**Квас Евгений Станиславович**  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
аспирант кафедры электромеханики и робототехники (№32)  
190000 г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская д. 67 лит.А  
E-mail: E.kvas@guap.ru

**Кузьменко Владимир Павлович**  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники (№32)  
190000 г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская д. 67 лит.А  
E-mail: mr.konnny@gmail.com

**Солёный Сергей Валентинович**  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники (№32)  
190000 г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская д. 67 лит.А  
E-mail: ssv55ssv@yandex.ru

---

KVAS E.S., KUZMENKO V.P., SOLENIY S.V.

### QUALITY CONTROL AND FLOW PARAMETER STABILIZATION ALGORITHM IN ROBOTIC LIQUID DISPENSING SYSTEMS

**Abstract.** This paper presents a method for developing a quality control and flow parameter stabilization algorithm for robotic liquid dispensing systems, based on partial differential equations (PDEs). The model accounts for the dynamic changes in volumetric flow rate and liquid concentration along the production line under the influence of

external disturbances. The application of control actions allows for the compensation of disturbances and stabilization of system parameters, ensuring a return to the nominal state. The results of numerical simulations confirm the effectiveness of the developed algorithm in stabilizing the production process.

**Keywords:** quality control, parameter stabilization, liquid flow, robotic dispensing systems, partial differential equations, external disturbances, modeling.

## BIBLIOGRAPHY

1. Gorelov, A.S. Metodologiya avtomatizirovannogo statisticheskogo kontrolya massovykh proizvodstv / A.S. Gorelov // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* – 2010. – № 2-1. – S. 173-186.
2. Dutta, P., & Kumar, A. (2020). Modelling of Liquid Flow control system Using Optimized Genetic Algorithm. *Statistics, Optimization & Information Computing.* <https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-618>.
3. Shkapov, P.M. Ustoychivost sistemy truboprovod nagruzochnyy agregat s ucheto neodnorodnosti svoystv potoka / P.M. Shkapov // *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* – 2010. – T. 16. – № 4. – S. 831-836.
4. Forestier-Coste, L., Göttlich, S., & Herty, M. (2015). Data-Fitted Second-Order Macroscopic Production Models. *SIAM J. Appl. Math.*, 75, 999-1014. <https://doi.org/10.1137/140989832>.
5. Sun, Y., Zhu, T., Zhang, L., & Denno, P. (2021). Parameter Identification for Bernoulli Serial Production Line Model. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18, 2115-2127. <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3035291>.
6. Ahuja, S., & Rowley, C. (2009). Feedback control of unstable steady states of flow past a flat plate using reduced-order estimators. *Journal of Fluid Mechanics*, 645, 447 - 478. <https://doi.org/10.1017/S0022112009992655>.
7. Pihnastyi, Oleh and Kozhevnikov, George, Распределенная динамическая PDE-модель программного управления загрузкой технологического оборудования производственной линии (Distributed Dynamic PDE-Model of Program Control by Utilization of the Technological Equipment of Production Line) (February 1, 2019). Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. Наука и прогресс транспорта. - Днепропетровск: ДНУЖД. - 2019. - № 1(79). - С. 81-93. – DOI: 10.15802/stp2019/159489, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3371237>
8. Pihnastyi, O.M. Obzor modeley upravlyaemykh proizvodstvennykh protsessov potochnykh linii proizvodstvennykh sistem / O.M. Pihnastyi // *Ekonomika. Informatika.* – 2015. – № 7 (204).
9. Pihnastyi, O., Yemelianova, D., & Lysytsia, D. (2020). Using PDE model and system dynamics model for describing multi-operation production lines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(4 (106), 54–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210750>
10. Hoher, S., Schindler, P., Göttlich, S., Schleper, V., & Röck, S. (2012). System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems., 316-321. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4_52).
11. Fedosenkov, D.B., Simikova, A.A., & Fedosenkov, B.A. Modalnoe upravlenie protsessami dozirovaniya v srede prostranstva sostoyaniy i veyvlet-preobrazovaniy / D.B. Fedosenkov, A.A. Simikova, B.A. Fedosenkov // *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika.* – 2019. – № 4. – S. 46-58.

**Kvas Evgeniy Stanislavovich**  
St. Petersburg State University of  
Aerospace Instrumentation  
PhD Student of the Department of  
Electromechanics and Robotics  
(No. 32)  
190000 St. Petersburg, ul.  
Bolshaya Morskaya d. 67 lit.A  
E-mail: E.kvas@guap.ru

**Kuzmenko Vladimir Pavlovich**  
St. Petersburg State University of  
Aerospace Instrumentation  
Candidate of Technical Sciences, no  
academic title  
Associate Professor of the Department of  
Electromechanics and Robotics (No. 32)  
190000 St. Petersburg, ul. Bolshaya  
Morskaya d. 67 lit.A  
E-mail: mr.konnny@gmail.com

**Soleniy Sergey Valentinovich**  
St. Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation  
Candidate of Technical Sciences,  
academic title associate  
professor  
Head of the Department of  
Electromechanics and Robotics  
(No. 32)  
190000 St. Petersburg, ul.  
Bolshaya Morskaya d. 67 lit.A  
E-mail: ssv555ssv@yandex.ru

© Квас Е.С., Кузьменко В.П., Солёный С.В., 2025

СОЛДАТКИН В.М., СОЛДАТКИН В.В., ЕФРЕМОВА Е.С., СОЛДАТКИН В.С.

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

**Аннотация.** Рассмотрены особенности построения и ограничения по применению широко используемых в авиации информационно-измерительных систем воздушных сигналов, построенных на основе аэрометрического, аэродинамического и флюгерных методов контроля параметров набегающего воздушного потока с помощью распределенных по фюзеляжу автономных датчиков первичной информации и разнесенного вычислителя, формирующего выходные сигналы системы. Разрабатываемые системы воздушных сигналов, построенные на основе вихревого и ионно-меточного методов контроля параметров набегающего потока так же полностью снимают ограничения по применению на сверхлегких и малоразмерных ЛА.

Опыт эффективного использования ультразвукового метода контроля параметров потока газов в расходомерии, метрологии и других областях, определяет перспективность информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока с одним интегрированным неподвижным приемником первичной информации в виде частотно-временных информативных сигналов, удобных для восприятия, преобразования и обработки во встроенном вычислителе.

Рассмотрены принципы построения, приводится функциональная схема и разработаны аналитические модели обработки информации и определения воздушных сигналов в ультразвуковых и высотно-скоростных измерительных каналах рассматриваемой системы. Приводятся достоинства, обеспечивающие конкурентоспособность применения рассматриваемой информационно-измерительной системы воздушных сигналов на сверхлегких и малоразмерных летательных аппаратах различного назначения.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, система воздушных сигналов, информационно-измерительная система, контроль набегающего воздушного потока, ультразвуковой метод, принципы построения, функциональная схема, аналитические модели сигналов, обработка, определение выходных сигналов, конкурентные преимущества системы.

### Введение

Движение широкого класса летательных аппаратов (ЛА) происходит в приземном возмущенном слое атмосферы и для пилотирования и автоматического управления, решения полетных задач необходима информация о воздушных сигналах, определяющих аэродинамику, устойчивость и безопасность движения ЛА в атмосфере [1, 2].

Как показывает анализ [3, 4], широко используемые на самолетах и других объектах авиационной техники информационно-измерительные системы воздушных сигналов, построены на основе аэрометрического, аэродинамического и флюгерного методов контроля параметров набегающего воздушного потока с помощью распределенных по фюзеляжу и вынесенных в набегающий поток приемников полного и статического воздушных давлений, приемников температуры торможения, флюгерных датчиков аэродинамических углов атаки и скольжения, устанавливаемых на правом и левом борту ЛА. Используемые автономные приемники и датчики первичной информации пневмопроводами и электрическими кабелями соединены с бортовым вычислителем, обеспечивающим преобразование и обработку информации, выдачу выходных сигналов информационно-измерительной системы воздушных сигналов в системы отображения информации и другим потребителям. Большое число автономных приемников и датчиков первичной информации, пневмопроводов и кабелей связи, разнесенный вычислитель приводят к усложнению конструкции, увеличению массы и стоимости таких традиционных систем воздушных сигналов, что ограничивает возможность их применения на сверхлегких самолетах и малоразмерных ЛА различного класса и назначения, определяет актуальность разработки информационно-измерительных систем воздушных сигналов, построенных на основе других методов контроля параметров набегающего воздушного потока с одним (интегрированным) неподвижным приемником потока и встроенным вычислителем.

**Принципы построения, достоинства и недостатки информационно-измерительных систем, построенных на основе вихревого и ионно-меточного методов контроля параметров набегающего воздушного потока.**

В работах [5 – 7] приводятся результаты исследования по разработке информационно-измерительной системы воздушных сигналов дозвукового ЛА с одним неподвижным приемником набегающего потока и встроенным вычислителем, построенная на основе вихревого метода контроля параметров набегающего воздушного потока. В качестве приемника используются две клиновидные пирамиды, основания которых расположены под одинаковым углом встречно потоку и контролируются частоты образования и срыва вихрей с поверхностей пирамид. По измеренным частотным срывам вихрей по разработанным аналитическим моделям в вычислителе определяются и формируются выходные сигналы системы по истинной воздушной скорости, и аэрометрическому углу в плоскости расположения клиновидных пирамид. Для расширения функциональных возможностей и измерения других воздушных сигналов предложено [6] на поверхности обтекателя, установленного на внешней торцовой поверхности клиновидных пирамид, расположить отверстие для восприятия статического давления набегающего потока, соединенного пневмопроводом с датчиком абсолютного давления, выход которого подключен ко входу вычислителя. По измеренным истинной воздушной скорости и статическому давлению по предложенным аналитическим моделям на выходе вычислителя формируются выходные сигналы по приборной скорости, числу Маха, барометрической высоте и вертикальной скорости, давлению, температуре и плотности окружающей среды на текущей высоте полета [7]. Предложенные научно-технические решения позволили упростить конструкцию, уменьшить массу и стоимость информационно-измерительной системы воздушных сигналов дозвукового ЛА на основе вихревого метода контроля параметров набегающего воздушного потока за счет использования одного неподвижного приемника первичной информации о параметрах набегающего воздушного потока в виде частотных информативных сигналов, упрощающих их восприятие, преобразование и обработку во встроенном вычислителе. Однако такая вихревая информационно-измерительная система имеет узкий диапазон измерения аэродинамического угла, ограниченный значением  $\pm 25$  угл. град, что не позволяет измерить угол скольжения в диапазоне его изменения до  $\pm 180$  угл. град. Кроме того, измерение воздушных сигналов ЛА вихревая информационно-измерительная система обеспечивает только в одной азимутальной или вертикальной ей плоскости. Все это сдерживает ее разработку и применение.

Проводится разработка информационно-измерительной системы воздушных сигналов ЛА, построенной на основе ионно-меточного метода контроля параметров набегающего воздушного потока. С помощью искрового разрядника, установленного на обтекаемой поверхности неподвижного приемника, в набегающем потоке периодически формируется ионная метка с явно выраженным электрическим зарядом, которая вносится в набегающий поток и приобретает его скорость и направление. С помощью расположенных на обтекаемой поверхности неподвижного приемника системы приемных электродов, расположенных равномерно на окружности с радиусом в точке установки разрядника, по сигналам, наводимым на приемных электродах движущейся заряженной ионной меткой, регистрируется скорость и угол траектории ее движения совместно с потоком. Многоканальная измерительная схема измеряет сигналы, наводимые на приемных электродах, которые обрабатывает встроенный вычислитель и по разработанным аналитическим моделям определяет и формирует выходные сигналы по истинной воздушной скорости и аэродинамическому углу в плоскости расположения приемных электродов в диапазоне до  $\pm 180$  угл. град. Для расширения функциональных возможностей и измерения других воздушных сигналов на обтекаемой поверхности неподвижного приемника установлено отверстие для восприятия статического давления, которое пневмоканалом соединено с датчиком абсолютного давления, выход которого подключен ко входу вычислителя, определяющим и формирующим выходные сигналы ионно-меточной информационно-измерительной системы по воздушным сигналам движения ЛА всем потребителям в широком диапазоне изменения аэродинамического угла, но также только в одной плоскости. Кроме того, жесткие требования к идентичности и стабильности характеристик измерительных каналов многоканальной измерительной схемы

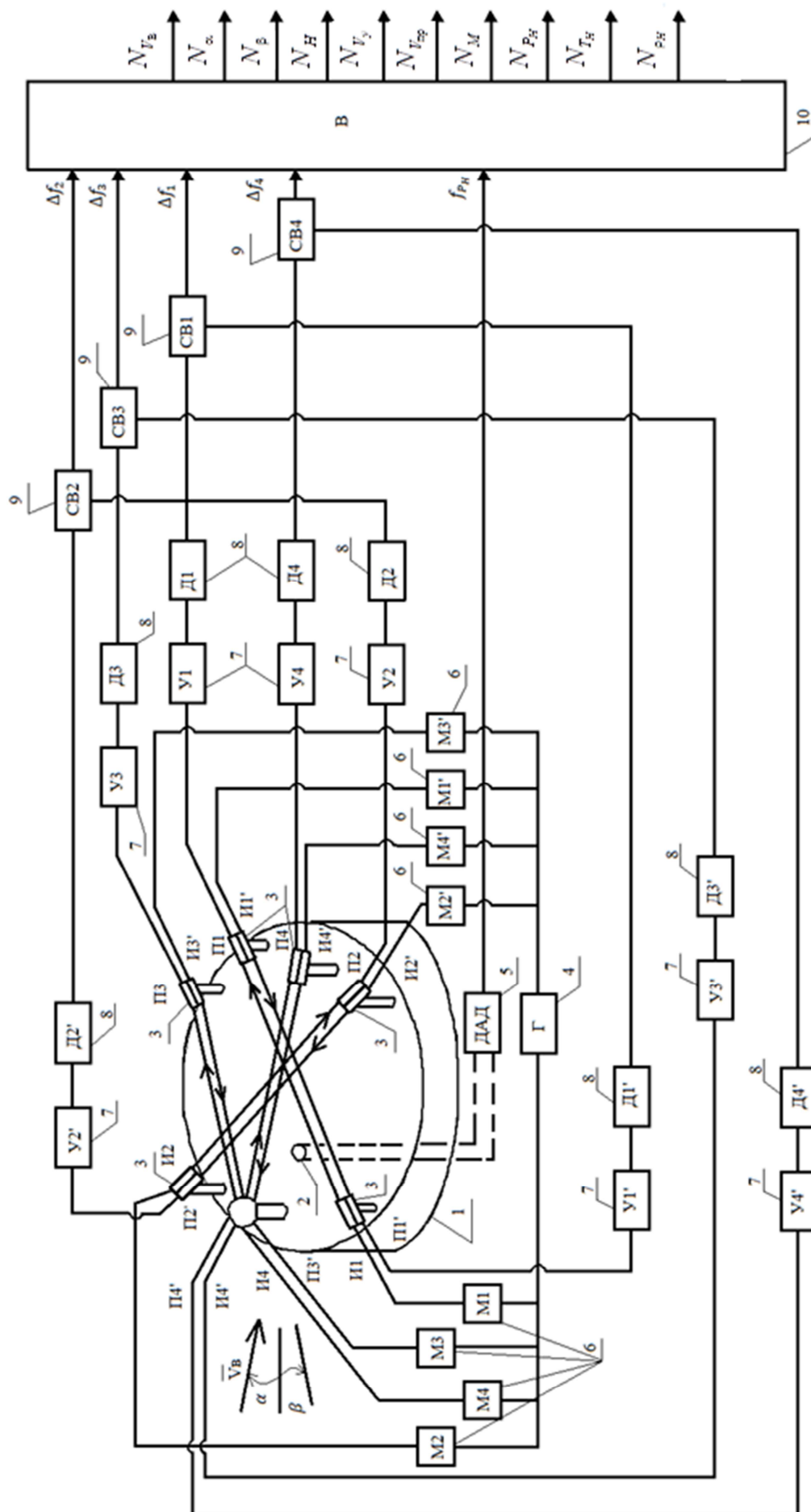
приводит к снижению технологичности и усложнению многоканальной измерительной схемы, что ограничивает применение ионно-меточной информационно-измерительной системы воздушных сигналов на малоразмерных летательных аппаратах.

**Принципы построения и функциональная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.**

Широкое применение ультразвукового метода измерения параметров потоков газа и жидкости в расходомерии и других областях [11 – 13] определили направления работ по разработке оригинального панорамного датчика аэродинамического угла и истинной воздушной скорости с неподвижным приемником и ультразвуковыми измерительными каналами [14] и рассматриваемой информационно-измерительной системы пространственного измерения воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока. Принцип действия измерительных каналов при использовании ультразвукового метода контроля скорости и угла направления контролируемого потока заключается в измерении разности интервалов времени распространения ультразвуковых колебаний от излучателя до приемника или в измерении разности частот формируемых на выходе приемника электрических сигналов при распространении ультразвуковых колебаний от излучателя до приемника по направлению контролируемого потока и против потока. При этом для измерения угла направления контролируемого потока используются два измерительных канала, оси распространения ультразвуковых колебаний которых разнесены в плоскости изменения контролируемого угла направления на одинаковый угол относительно оси, параллельной продольной оси, относительно которого отсчитывается контролируемый угол [15].

На рисунке приведена функциональная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока. Система содержит вынесенную за обшивку ЛА плату 1, на которой на стойках 3 расположены совмещенные пары излучателей-приемников ультразвуковых колебаний И1–П1, И2–П2 и И'1–П'1, И'2–П'2, расположенных по окружности в плоскости изменения угла скольжения  $\beta$ . При этом оси распространения их ультразвуковых колебаний, расположены под углом  $\Theta_0 = 45^\circ$  к оси, параллельной продольной оси ЛА в плоскости угла скольжения. Пары излучателей-приемников И3–П3, И4–П4 и И'3–П'3, И'4–П'4 установлены в плоскости изменения угла атаки  $\alpha$  и их оси распространения ультразвуковых колебаний расположены под углом  $\varphi_0 = 45^\circ$  у оси, параллельной оси ЛА в плоскости изменения угла атаки.

Пьезоэлектрические излучатели И1, И2, И3, И4 генерируют ультразвуковые колебания, которые распространяются по направлению вектора  $\vec{V}$  набегающего воздушного потока в плоскости изменения измеряемых аэродинамических углов, которые воспринимаются соответствующими пьезометрическими приемниками П1, П2, П3, П4. Излучатели И'1, И'2, И'3, И'4 генерируют ультразвуковые колебания, которые распространяются встречно набегающему потоку и принимаются приемниками П'1, П'2, П'3, П'4. Все излучатели через соответствующие модуляторы М1, М2, М3, М4 и М'1, М'2, М'3, М'4, работающие в триггерном режиме переключения, подключены к генератору 4 колебаний высокой частоты. При восприятии ультразвуковых колебаний от излучателей И1, И2, И3, И4 и И'1, И'2, И'3, И'4 на выходе пьезоэлектрических приемников П1, П2, П3, П4 и П'1, П'2, П'3, П'4 формируются электрические сигналы с частотами  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$ , которые усиливаются соответствующими усилителями 7 и подаются на выходы детекторов 8, на выходах которых выделяются частоты  $f_1, f_2, f_3, f_4$  и  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$  формирования выходных сигналов приемников, регистрируемых ультразвуковые колебания по направлению набегающего потока и против потока. Измеренные в вычислителе 10 частоты  $f_1$  и  $f'_1, f_2$  и  $f'_2, f_3$  и  $f'_3, f_4$  и  $f'_4$  подаются на входы схем вычитания частот 9 СВ1, СВ2, СВ3, СВ4, на выходах которых формируются разности  $\Delta f_1 = f_1 - f'_1, \Delta f_2 = f_2 - f'_2, \Delta f_3 = f_3 - f'_3, \Delta f_4 = f_4 - f'_4$ .



**Рисунок 1 – Функциональная схема информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего потока**

Выходы схем вычитания частот 9 подключены ко входам вычислителя 10, который по разработанным аналитическим моделям определяет и выдает цифровые выходные сигналы ультразвукового измерительного канала измерительно-вычислительной системы воздушных сигналов по истинной воздушной скорости  $N_{V_B}$ , по углу атаки  $N_\alpha$ , по углу скольжения  $N_\beta$ .

Для получения информации о высотно-скоростных параметрах движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды на поверхности плиты 1 (рисунок) расположено отверстие 2 для восприятия статического давления  $P_H$  набегающего воздушного потока, которое пневмопроводом соединено со входом датчика абсолютного давления 5 (ДАД) с частотным выходом, подключенным ко входу вычислителя 10. По измеренному статическому давлению  $P_H$  и вычисленной в ультразвуковом измерительном канале истинной воздушной скорости  $V_B$  в вычислителе 10 по приведенным ниже аналитическим моделям определяются и формируются цифровые сигналы высотно-скоростного измерительного канала измерительно-вычислительной системы воздушных сигналов по барометрической высоте  $N_H$ , вертикальной скорости  $N_{V_y}$ , приборной скорости  $N_{V_{пр}}$ , числу Маха  $N_M$ , а при необходимости по статическому давлению  $P_H$ , температуре наружного воздуха  $N_{T_H}$ , плотности  $N_{\rho_H}$  окружающей среды на текущей барометрической высоте полета  $H$ .

**Аналитические модели формирования и обработки информативных сигналов, определения воздушных сигналов в каналах информационно-измерительной системы.**

Как отмечалось выше, работа ультразвукового измерительного канала основана на регистрации и преобразовании интервалов времени распространения ультразвуковых колебаний от пьезоэлектрических излучателей до соответствующих пьезоэлектрических приемников по направлению набегающего воздушного потока и против потока. Работа ультразвукового измерительного канала начинается с подачей сигнала начала измерения от вычислителя на модулятор М1, который открывается и пропускает высокочастотные колебания от генератора 4 на вход излучателя И1. На выходе пьезоэлектрического излучателя И1 в соответствии с прямым пьезоэлектрическим эффектом генерируются ультразвуковые колебания, распространяемые в сторону пьезоэлектрического приемника П1. При достижении ультразвуковых колебаний пьезоэлектрического приемника П1 через интервал времени  $t_1$  на выходе приемника П1 в соответствии с обратным пьезоэлектрическим эффектом появляются электрические колебания, которые усиливаются усилителем У1 и демодулируются демодулятором Д1. Как только на выходе демодулятора появляется электрический сигнал он поступает на модулятор М1 и закрывает его, а открывает модулятор М1' и высокочастотные колебания от генератора 4 подаются на пьезоэлектрический излучатель И1', который генерирует ультразвуковые колебания в сторону пьезоэлектрического приемника П1' против направления контролируемого потока, который через интервал времени  $t_1'$  достигает приемника П1' и на его выходе появляется электрический сигнал, который усиливается усилителем У1' и демодулируется демодулятором Д1'. При появлении сигнала на выходе демодулятора Д1' он закрывает модулятор М1' и открывает модулятор М2. Высокочастотные колебания от генератора 4 поступают на вход пьезоэлектрического излучателя И2 и процесс измерения снова повторяется. Аналогично для излучателей И3, И3' и И4, И4'. Далее аналогично новые циклы измерения параметров набегающего воздушного потока.

Для совмещенных пар излучателей-приемников И1–П1, И1'–П1' и И2–П2, И2'–П2' интервалы времени  $t_1$ ,  $t_1'$  и  $t_2$ ,  $t_2'$  распространения ультразвуковых колебаний по направлению набегающего воздушного потока и против потока будет определяться выражениями:

$$t_1 = \frac{L}{a + V \cos(\Theta_0 + \beta)}; \quad t'_1 = \frac{L}{a - V \cos(\Theta_0 + \beta)}; \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{L}{a + V \cos(\Theta_0 - \beta)}; \quad t'_2 = \frac{L}{a - V \cos(\Theta_0 - \beta)},$$

где  $L$  – расстояние между излучателями И1, И1 и приемниками П1, П1 УК;  
 $a$  – скорость распространения звука в воздухе;  $\beta$  – угол скольжения.

Частоты  $f_1$ ,  $f'_1$  и  $f_2$ ,  $f'_2$  сигналов, формируемых на выходах приемником П1, П1' и П2, П2', можно описать выражениями

$$f_1 = \frac{1}{L} [a + V \cos(\Theta_0 + \beta)]; \quad f'_1 = \frac{1}{L} [a - V \cos(\Theta_0 + \beta)]; \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{1}{L} [a + V \cos(\Theta_0 - \beta)]; \quad f'_2 = \frac{1}{L} [a - V \cos(\Theta_0 - \beta)]$$

Тогда информативные разности частот  $\Delta f_1 = f_1 - f'_1$  и  $\Delta f_2 = f_2 - f'_2$  на входе вычислителя, формируемые на выходах схем вычитания частот  $f_1$ ,  $f_2$  ультразвуковых колебаний, распространяющихся по направлению набегающего потока, и частот  $f'_1$ ,  $f'_2$ , воспринимаемых против потока, будут описываться аналитическими моделями вида

$$\Delta f_1 = \frac{2V}{L} \cos(\Theta_0 + \beta); \quad \Delta f_2 = \frac{2V}{L} \cos(\Theta_0 - \beta). \quad (3)$$

Подставляя косинусы суммы и разности в виде

$$\cos(\Theta_0 + \beta) = \cos \Theta_0 \cos \beta + \sin \Theta_0 \sin \beta;$$

$\cos(\Theta_0 - \beta) = \cos \Theta_0 \cos \beta - \sin \Theta_0 \sin \beta$ , при  $\Theta_0 = 45^\circ$ , получим

$$\Delta f_1 = \frac{\sqrt{2}V}{L} (\cos \beta + \sin \beta); \quad \Delta f_2 = \frac{\sqrt{2}V}{L} (\cos \beta - \sin \beta). \quad (4)$$

Тогда с учетом соотношений

$$\Delta f_1 + \Delta f_2 = \frac{2\sqrt{2}}{L} V \cos \beta; \quad \Delta f_1 - \Delta f_2 = \frac{2\sqrt{2}}{L} V \sin \beta.$$

получена аналитическая модель определения угла скольжения в виде

$$\beta = \arctg \frac{\Delta f_1 - \Delta f_2}{\Delta f_1 + \Delta f_2}. \quad (5)$$

С учетом соотношений

$$\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2 = \frac{2}{L^2} V^2 [(\cos \beta + \sin \beta)^2 + (\cos \beta - \sin \beta)^2] = \frac{4}{L^2} V^2.$$

аналитическая модель для определения истинной воздушной скорости  $V_B = V$  будет иметь вид

$$V_B = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}. \quad (6)$$

Полученные аналитические модели (5) и (6) определяют процесс определения выходных сигналов ультразвукового измерительного канала в азимутальной плоскости.

С помощью совмещенных пар излучателей-приемников ИЗ–ПЗ, ИЗ'–ПЗ' и И4–П4, И4'–П4', используя выше изложенный подход, получены аналитические модели для определения истинной воздушной скорости  $V_B$  и угла атаки  $\alpha$  в вертикальной плоскости в виде

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta f_3 - \Delta f_4}{\Delta f_3 + \Delta f_4}. \quad (7)$$

$$V_B = \frac{L}{2} \sqrt{\Delta f_3^2 + \Delta f_4^2}, \quad (8)$$

где  $\Delta f_3 = f_3 - f'_3$ ;  $\Delta f_4 = f_4 - f'_4$ ;  $f_3$ ,  $f_4$  и  $f'_3$ ,  $f'_4$  – частоты выходных сигналов приемников ПЗ, П4 и ПЗ', П4', регистрирующих распространение ультразвуковых колебаний по направлению контролируемого потока и против потока.

Высотно-скоростные параметры движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды определяются по аналитическим моделям в соответствии с ГОСТ 4.401-81 [16].

Абсолютная (барометрическая) высота  $H$  соответствует геопотенциальной высоте над уровнем моря в условиях стандартной атмосферы и определяется по формулам [17]

- при  $-2000 \text{ м} < H < 11000 \text{ м}$

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] \approx \frac{T_0 + T_H}{2} R \ln \left( \frac{P_0}{P_H} \right); \quad (9)$$

- при  $11000 \text{ м} < H \leq 15000 \text{ м}$

$$H = H_{11} + RT_{11} \ln \frac{P_{11}}{P_H}, \quad (10)$$

где  $T_0 = 288,15 \text{ К}$ ,  $T_{11} = 211,65 \text{ К}$  и  $P_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $P_{11} = 22632 \text{ Па}$  – температура и абсолютное давление на высоте  $H=0$  и  $H=11000 \text{ м}$ ;  $\tau=0,0065 \text{ К/м}$  – температурный градиент;  $R=29,27125 \text{ м/К}$  – газовая постоянная воздуха;  $T_H$  и  $P_H$  – абсолютная температура и давление воздуха на текущей высоте  $H$ .

Вертикальная скорость  $V_y$  определяется по производной во времени абсолютной (барометрической) высоте  $H$  как

$$V_y = \frac{dH}{dt} \approx \frac{1}{4\Delta t} [H(t_i) - H(t_i - 2\Delta t) + H(t_i - \Delta t) - H(t_i - 3\Delta t)], \quad (11)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени, через который вычисляется абсолютная высота.

По определяемой в ультразвуковом измерительном канале истинно воздушной скорости  $V_B$  приборная скорость  $V_{пр}$  вычисляется по аналитической модели вида [18]

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{P_H T_0}{P_0 T_H}} V_B. \quad (12)$$

Используя связь с истинной воздушной скорости  $V_B$ , число Маха определяется по аналитической модели вида [18]

$$M = \frac{V_B}{\sqrt{kgRT_H}}, \quad (13)$$

где  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;  $k = 1,4$  – показатель адиабаты для воздуха.

Входящая в выражения (12) и (13) абсолютная температура  $T_H$  воздуха на высоте полета  $H$  легко определяется с помощью проводникового терморезистора, установленного в пневмопроводе статического давления, включенного в мостовую измерительную схему, выход которой подключен к вычислителю. В условиях эксплуатации ЛА, близких к стандартной атмосфере, температуру наружного воздуха можно определить по аналитической модели вида [17]

$$T_H = T_0 - \tau H. \quad (14)$$

Используя работу [19], аналитическая модель для определения плотности воздуха  $\rho_H$  на высоте  $H$  имеет вид

$$\rho_H = \rho_0 \frac{P_H T_0}{P_0 T_H}, \quad (15)$$

где  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3 = 0,125 \text{ Нс/м}^4$  – массовая плотность воздуха на высоте  $H=0$  стандартной атмосферы по ГОСТ 4.401-81 [16].

### Заключение

Разработанные функциональная схема и аналитические модели формирования первичных информативных сигналов, их обработки и определения воздушных сигналов в ультразвуковых и высотно-скоростных измерительных каналах являются теоретической основой построения и позволяют обоснованно проводить разработку и исследование информационно-измерительной системы воздушных сигналов летательного аппарата на

основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока.

В сравнении с известными системами воздушных сигналов ЛА рассматриваемая информационно-измерительная система является чисто электронной системой с одним интегрированным неподвижным приемником набегающего воздушного потока и встроенным компьютеризированным устройством обработки и выдачи цифровой информации в системы автоматического управления и пилотирования ЛА. Это позволяет отнести рассматриваемую информационно-измерительную систему воздушных сигналов летательного аппарата к классу мехатронных измерительных систем. Отсутствие подвижных элементов, соединительных пневмопроводов и кабелей связи, частотно-временные первичные информативные сигналы, получение выходных сигналов по всем воздушным сигналам непосредственно в цифровой форме существенно снижает массу, упрощает конструкцию и снижает стоимость такой мехатронной информационно-измерительной системы, повышает надежность работы и точность измерения, упрощает ее использование в современных бортовых системах автоматического управления, пилотирования и отображения информации, в других технических системах. Все это повышает конкурентоспособность применения рассматриваемой мехатронной информационно-измерительной системы воздушных сигналов на малоразмерных, пилотируемых и беспилотных ЛА, на других классах ЛА, повышая качество их управления, безопасность полетов и эффективность решения полетных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Г.А. Безопасность полетов в возмущенной атмосфере / Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.В. Сильвестров. – М.: Транспорт. – 1992. – 272с.
2. Макаров Н.Н. Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса: Теория, проектирование, применение / Н.Н. Макаров; под ред. д-ра техн. наук В.М. Солдаткина. – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет. – 2009. – 760с.
3. Клюев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов / Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов / Под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ. – 2005. – 509 с.
4. Солдаткин В.М. Авиационные приборы, измерительно-вычислительные системы и комплексы: Принципы построения, алгоритмы обработки информации, характеристики и погрешности: Учебное пособие / В.М. Солдаткин, Ф.А. Ганеев, В.В. Солдаткин, А.В. Никитин; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Солдаткина. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2014. – 526с.
5. Ефремова Е.С. Теоретические основы построения вихревой системы измерения высотно-скоростных параметров дозвукового летательного аппарата / Е.С. Ефремова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – С. 166-176.
6. Пат. 2556760 Российская Федерация, МПК G01P5/20. Вихревой датчик аэродинамического угла и истинной воздушной скорости / В.М. Солдаткин, Е.С. Солдаткина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ». – № 201416035/28; заявл. 21.04.2014; опубл. 20.07.2015. Бюл. № 20. – 15с.
7. Ефремова Е.С. Построение и погрешности системы воздушных сигналов на основе вихревого метода / Е.С. Ефремова, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т.63. – №8. – С. 749-755.
8. Солдаткин В.М. Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов / В.М. Солдаткин. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2001. – 448 с.
9. Ганеев Ф.А. Ионно-меточный датчик аэродинамического угла и воздушной скорости с логометрическими информативными сигналами и интерполяционной схемой обработки / Ф.А. Ганеев, В.М. Солдаткин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2020. – № 3. – С. 97-103.
10. Солдаткин В.М. Теоретические основы построения системы воздушных сигналов самолета с неподвижным невыступающим приемником потока / В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Д.Л. Крылов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Том 18. – №7. – С. 495-502.
11. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества / П.П. Кремлевский // Изд. 3-е., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. – 1975. – 776 с.
12. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор / А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 23. – № 7. – С. 585-600.
13. Богомолов В.Ю. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогнозирования опасных метеорологических явлений / В.Ю. Богомолов, А.Я. Богушевич, Е.П. Гордов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – №17. – С. 52-59.
14. Ефремова Е.С. Трехкомпонентный датчик вектора воздушной скорости летательного аппарата на основе ультразвукового метода контроля параметров набегающего воздушного потока / Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.С. Солдаткин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2023. – Т. 79. – №. 1. – С. 95-100.
15. Ефремова Е.С. Методические погрешности электронного датчика параметров вектора воздушной скорости летательного аппарата / Е.С. Ефремова, Б.И. Мифтахов, В.В. Солдаткин, В.М. Солдаткин // Известия

вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С. 457-463.

16. ГОСТ 4.401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М.: Изд-во Стандартов. – 1981. – 179с.

17. Боднер В.А. Приборы первичной информации / В.А. Боднер. – М.: Машиностроение. – 1981. – 344 с.

18. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов / Д.А. Браславский. – М.: Машиностроение. – 1970. – 392 с.

19. Залманзон Л.А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления / Л.А. Залманзон. – М.: Изд-во АН СССР. – 1961. – 249 с.

**Солдаткин Владимир Михайлович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Профессор кафедры электронного приборостроения  
и менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Вячеслав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Профессор кафедры электронного приборостроения  
и менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Ефремова Елена Сергеевна**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Доцент кафедры электронного приборостроения и  
менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Солдаткин Владимир Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань,  
Студент кафедры электронного приборостроения и  
менеджмента качества  
420111, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 10  
тел. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

---

SOLDATKIN V.M., SOLDATKIN V.V., EFREMOVA E.S., SOLDATKIN V.S.

## **INFORMATION AND MEASURING SYSTEM OF AIR SIGNALS OF AN AIRCRAFT BASED ON ULTRASONIC METHOD FOR MONITORING PARAMETERS OF INCIDENT AIR FLOW**

**Abstract.** *The features of the construction and limitations on the use of air signal information-measuring systems widely used in aviation, built on the basis of aerometric, aerodynamic and weathervane methods for monitoring the parameters of the incoming air flow using autonomous primary information sensors distributed throughout the fuselage and a spaced computer that generates the output signals of the system, are considered. The developed air signal systems, built on the basis of vortex and ion-tag methods for monitoring the parameters of the oncoming flow, also completely remove restrictions on use on ultra-light and small-sized aircraft.*

*The experience of effective use of the ultrasonic method for monitoring gas flow parameters in flow metering, metrology and other areas determines the prospects of the information-measuring system of aircraft air signals based on the ultrasonic method for monitoring the parameters of the incoming air flow with one integrated fixed receiver of primary information in the form of time-frequency informative signals, convenient for perception, conversion and processing in the built-in computer.*

*The principles of construction are considered, a functional diagram is given, and analytical models of information processing and determination of air signals in ultrasonic and altitude-speed measuring channels of the system under consideration are developed. The advantages are given that ensure the competitiveness of the use of the considered information-measuring system of air signals on ultra-light and small-sized aircraft for various purposes.*

**Keywords:** *aircraft, air signal system, information-measuring system, control of incoming air flow, ultrasonic method, principles of construction, functional diagram, analytical models of signals, processing, determination of output signals, competitive advantages of the system.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Filatov G.A. Bezopastnost poletov v vozmychennou atmosphere / G.A. Filatov, G.S. Pyminova, P.V. Silvestrov. – М.: Transport. – 1992. – 272s.

2. Makarov H.H. Sistemy obespecheniya bezopastnosti funkcionirovaniya bortovogo ergaticheskogo kompleksa: Teoriya, proektirovanie, priminenie / H.H. Makarov; pod red. d-ra tech. nauk V.M. Soldatkina. – М.: Mashinostroyeniye-Polet. – 2009. – 760s.

3. Kljuev. G.I. Izmeriteli dinamicheskikh parametrov letatelnyh apparatov / G.I. Kljuev, N.N. Makarov, V.M. Soldatkin, I.P. Efimov: Uchebnoe posobie. Uljanovsk: Izd-vo Uljanovsk. gos. tehn. un-t. – 2005. – 590 s.

4. Soldatkin V.M. Aviatsonnye pribory, izmeritelbo-vicheslitelnye sistemy I komplekсы: Printipsy postroenia,

algoritmy obrabotki informatsie, karakteristiki i pogrechnosti: Uchebnoe posobie / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. un-ta. – 2014. – 526s.

5. Efremova E.S. Toreticheskiye osnovy postroenia vixrevoy sistemy izmerenia vysotno-skorostnykh parametrov dozvykovogo letatel'nogo apparata / E.S. Efremova // Izvestia Tylskogo gosudarstvennogo universiteta. Technicheskii nauki. – 2017. – S. 166-176.

6. Patent 2556760 RF, MPK G01P5/20. Vihrevoy datchik ajerodinamicheskogo ugla i istinnoj vozdukhnoy skorosti / V.M. Soldatkin, E.S. Soldatkina; zajavitel I patentoobladatel FGBOU VO «Kazanskia nachionalniy issledovatel'skiy tachnicheskii universitet im. A.N. Tupoleva-KAI». – №201416035/28; zajavl. 21.04.2014; opubl. 20.07.2015. Bjul. № 20. – 15s.

7. Efremova E.S. Postroenie i pogrechnosti sistemy vozduchnix signalov na osnove vihrevogo metoda / E.S. Efremova, V.M. Soldatkin // Izvestia vyzov. Priborostroenie. – 2020. – T.63. – № 8. – S. 749-755.

8. Soldatkin V.M. Metody i sredstva izmerenija ajerodinamicheskikh uglov letatel'nykh apparatov / V.M. Soldatkin. – Kazan: Izd-vo Kazan. gos. tehn. un-ta. – 2001. – 448 s.

9. Ganeev F.A. Ionno-metochnyi datchik ajerodinamicheskogo ugla i vozdukhnoy skorosti s logometricheskimi informativnymi signalami i interpolaychionnoy sxemoy obrabotki / F.A. Ganeev, V.M. Soldatkin // Izvestia vyzov. Avictionnay tehnika. – 2020. – № 3. – S. 97-103.

10. Soldatkin V.M. Toreticheskiye osnovy postroenia sistemy vozdukhnykh signalov samoleta s nepodviznim nevstupauzchym priemnikom potoka / V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, D.L. Krilov // Mechatronika, avtomatizatsia, upravlenie. – 2017. – T.18. – № 7. – S. 495-502.

11. Kremlevskiy P.P. Rasxodomery i schetchiki kolichestva / P.P. Kremlevskiy // Izd. 3-e., pererab. i dop. L: Mashinostroyeniye. – 1975. – 776.

12. Tixomirov A.A. Ul'trazvukovye anemometry dlya izmerenia pelsactiy skorosti i temperetury vozduchnix potokov. Obzor / A.A. Tixomirov // Optika atmosfery i okeana. – 2008. – T.23. – № 7. – S. 585-600.

13. Bogomolov V.Ju. Informachionno-izmeritel'nay sistema dlya regional'nogo monitoring i prognozirovania opastnix meteorologicheskikh javleniy / V.Ju. Bogomolov, A.Ja. Bogychevich, E.P. Gordov i dr. // Optika atmosfery i okeana. – 2011. – T. 24. – №17. – S. 52-59.

14. Efremova E.S. Trexkomponentniy datchik vektora vozdukhnoy skorosti letatel'nogo apparata na osnove ul'trazvukovogo metoda kontroly parametrov nabegauchego vozdukhnoy notoka / E.S. Efremova, B.I. Miftchachov, V.S. Soldatkin // Vestnik KGTU im. A.H. Typoleva. – 2023. – T. 79. - №. 1. – S. 95-100.

15. Efremova E.S. Metodicheskie pogrechnosti elektronnoy datchika parametrov vektora vozdukhnoy skorosti letatel'nogo apparata / E.S. Efremova, B.I. Miftchachov, V.V. Soldatkin, V.M. Soldatkin // Izvestiay vyzov. Priborostroenie. – 2023. – T. 66. – № 6. – S. 457-463.

16. GOST 4401-81. Atmosfera standartnaya. Parametry. – M.: Izd-vo Standartov. – 1981. – 179s

17. Bodner V.A. Pribozy pervechnoy informacie / V.A. Bodner. – M: Mashinostroyeniye. – 1981. – 344s.

18. Braslavskiy D.A. Pribozy i datchiki letatel'nogo apparata / D.A. Braslavskiy. – M: Mashinostroyeniye. – 1970. – 392s.

19. Zalmanzol L.A. Protochnie element pnevmaticheskikh priporov kontroly i upravleniy / L.A. Zalmanzol. – M: Izd-vo AN SSSP. – 1961. – 249s.

#### **Soldatkin Vladimir Mikhailovich**

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

#### **Soldatkin Vyacheslav Vladimirovich**

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

#### **Efremova Elena Sergeevna**

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Associate Professor of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: soldatkina1991@bk.ru

#### **Soldatkin Vladimir Sergeevich**

FSBEI HE «Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI», Kazan, Student of Department of Electronic Instrument Making and Quality Management  
420111, Kazan, K.Marksa str,10  
Ph. 8(843)231-03-60  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

© Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С., Солдаткин В.С., 2025

КОРНИЕНКО А.В., МАРТЫНЕЦ Е.Р., ЛЕВЕНЦОВ В.А.

## ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ «НАДЕЖНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ». КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ

**Аннотация.** В статье рассмотрены устоявшиеся подходы к определению надежности оборудования – в узком смысле это свойство оборудования сохранять работоспособность при определенных условиях. Однако современные тенденции формирования экономики данных, внедрения информационных систем в промышленность и реагирования на возникшие геополитические и экономические вызовы приводят к необходимости реорганизации процессов, связанных с контролем и управлением надежностью всей производственной системы. В связи с этим на основании рассмотренных определений систематизированы основные признаки, заложенные авторами в определение надежности. На основе выявленных систематизированных факторов предложено определение надежности, которое учитывает особенности трансформации промышленных предприятий. Кроме того, в качестве предмета для обсуждения рассмотрена возможность внедрения технологии цифровых двойников как инструмента мониторинга и повышения уровня надежности оборудования. При этом отмечено, что надежность оборудования как количественно измеримый показатель связана прежде всего с двумя взаимобратными показателями – вероятностью безотказной работы оборудования и вероятностью выхода оборудования из строя (вероятностью отказа). На основании проведенной работы предложена классификация технологического оборудования в зависимости от уровня надежности, где выделен высокий, приемлемый, низкий и критический уровень надежности.

**Ключевые слова:** надежность, оборудование, отказ, безотказность, эксплуатация, вероятность, цифровые технологии, цифровой двойник.

### Введение

В условиях геополитических изменений, формирующихся политических, экономических и технологических вызовов, трансформации взаимодействия предприятий и масштабирования передовых цифровых технологий в рамках деятельности промышленных предприятий требуются новые подходы к производству высокотехнологичной продукции. В настоящий момент с целью обеспечения национальной безопасности и глобальной конкурентоспособности Российской экономики, рядом нормативно-правовых документов на государственном уровне введены показатели по уровню внедрения цифровых технологий на предприятиях, определены направления развития в части формирования импортозамещающего и импортоопережающего уклада, достижения технологического суверенитета и импортонезависимости.

Отсутствие контроля за состоянием оборудования, как правило, приводит к возникновению новых, «тонких» эффектов и изменению физических процессов, протекающих при эксплуатации оборудования, в связи с чем необходимо совершенствовать методы и подходы к оценке и обеспечению надежности оборудования. Без надежного технологического оборудования и достаточной технологической оснащенности невозможно производить конкурентоспособную продукцию, особенно в условиях формирования технологического суверенитета [1].

Цель исследования – рассмотреть основные подходы к определению надежности оборудования и определить направления совершенствования устоявшихся подходов. Так, в исследовании проведен анализ научной литературы и систематизированы определяющие факторы, используемые в определениях надежности. На основе проведенного анализа предложено определение надежности, актуализированное в соответствии с тенденциями цифровой трансформации предприятий. Кроме того, в работе предложена классификация технологического оборудования в зависимости от уровня надежности, который определяется через взаимобратные друг другу показатели – вероятность безотказной работы и вероятность наступления отказа.

## Обзор литературы

В рамках данного исследования проанализировано свыше 60 документов, содержащих определение надежности, часть из которых приведена в Таблице 1. На основании проведенного анализа выявлена необходимость проведения комплексного исследования, направленного на модернизацию подходов к определению надежности в связи с трансформацией организационно-производственных процессов, вызванной повсеместным и масштабным внедрением передовых цифровых и производственных технологий.

Важно отметить, что в данной работе под объектом надежности мы будем понимать в первую очередь единицу оборудования, которая может быть эквивалентна понятию «механизм», «система».

В проанализированных источниках и документах приводится многообразие определений надежности, а также надежности оборудования. Конечно, очевидным является превалирование в отечественных материалах отсылок к определению надежности, которое закреплено стандартом ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» [2] (см. таблицу 1). Ряд источников приводит определение термина из ГОСТ с незначительными изменениями или сокращениями, что, однако, существенно не влияет на определяемый объект.

Среди отечественных интересным представляется определение параметрической надежности технологического оборудования, данное в 2016 году авторами Иванниковым С.Н. и Манаенковым И.В. [3] В определении отмечено, что требования к качеству изготавливаемых деталей (шире – изделий, систем) непрерывно возрастают. Данное определение позволяет сделать вывод о непрерывной изменчивости понятия «надежность» применительно к оборудованию и зависимости как самого понятия, так и его свойств, количественных и измеримых показателей, от внешних воздействующих факторов. Такие факторы могут определяться как рыночными условиями (например, изменение рыночной конъюнктуры может приводить к снижению актуальности и потребности в отдельных видах изделий), так и физико-механическими процессами, определяющими работоспособность оборудования и его состояние (в том числе уровень технологичности и износа).

Еще одно определение, которое следует рассмотреть отдельно – определение надежности, данное авторами П.С. Королевым, С.Н. Полесским, В.Э. Цветковым и др. в издании «Основы надежности вычислительных систем» [4]. В определении указана фокусировка на взаимосвязи надежности и пригодности к условиям эксплуатации. Другими словами, надежность как таковая является отражением того, насколько рассматриваемый нами объект (система, механизм, оборудование и т.п.) пригоден к работе в нормальных условиях эксплуатации. Приведенный тезис позволяет сделать вывод о необходимости отслеживания длительности надежности как фактора, имеющего продолжительный характер. Выход оборудования из строя – это нарушение нормальных режимов работы оборудования, то есть, как правило, отказ оборудования (системы) вызван аварийным состоянием или нарушением условий работы.

Аналогичный акцент на привязке к режимам работы сделан в определении Н.Д. Проницева и А.П. Шулепова в пособии «Технологические методы обеспечения надежности двигателей летательных аппаратов» [5]. В частности, авторы отмечают важность учета соблюдения расчетных режимов работы, то есть режимов, определенных для функционирования данной системы в процессе ее проектирования.

Важное примечание к определению надежности дано А.К. Любимовым в пособии «Введение в теорию надёжности: проектно-ориентированный подход» [6]: термин «надежность», который определяется через свойство готовности, безотказности и ремонтпригодности объекта, используют только для общего неколичественного описания надежности. Из этого следует вывод о значимости проведения работ, направленных на квалиметрическую оценку показателей надежности, что подразумевает определение перечня количественных показателей, определяющих надежность применительно к конкретному виду объекта (типу оборудования).

Отдельно следует рассмотреть определения надежности, предложенные зарубежными авторами. В частности, Покорны С. (Pokorní S.J.) [7] определяет надежность через соответствие заданным стандартам производительности, при этом в данном случае «стандарты производительности» могут подразумевать как «стандарт», «эталон» показателей функционирования объекта, заданные производителем, так и показатели, определяемые отраслевыми нормативными документами и стандартами. При этом автор приводит, что объект должен «достигать желаемые результаты», то есть его рабочая функция (назначение) должна непрерывно выполняться.

В другом издании зарубежных авторов «Руководство надежности, пригодности, технического обслуживания и безопасности в проектировании инженерных конструкций» само определение содержит взаимосвязанные и взаимодополняемые друг друга характеристики надежности – с одной стороны, надежность приводится как вероятность успешного функционирования систем, что подразумевает отсутствие отказов; с другой стороны, автор упоминает минимальный риск износа, аварии или сбоя системы, что напрямую соответствует понятию «успешного функционирования». В случае нарушения любого из этих условий автоматически нарушается и другое. Тем самым автор делает фокусировку на «двугранности» понятия надежности – либо система работает, и работает успешно при соблюдении всех условий, требований и проч., либо система выходит из строя, то есть риск сбоя возрастает, что уже свидетельствует о ее недостаточной надежности.

Все приведенные современные определения надежности так или иначе связывают надежность со свойствами долговечности и безотказности, способностью работать в заданных режимах, выполнением рабочих функций и т.д. Данные определения сфокусированы, в первую очередь, на качественных показателях функционирования оборудования, в определениях не упоминается необходимость отслеживания характеристик надежности количественно. Кроме того, в данных определениях не учтена привязка к оказываемому влиянию на систему оборудования – что зачастую нарушение работы отдельного оборудования может повлечь за собой серьезные последствия для производства, и из-за этого зависят те характеристики надежности, которые необходимо отслеживать. Не исключается также влияние на систему таких факторов, которые не были предусмотрены на этапе проектирования системы.

Следует рассмотреть и историческое формирование основ определения надежности. Основательный обзор теории надежности с хронологическими рамками и анализом вклада отдельных авторов в концепцию приведен в материалах «Основы теории надежности» авторов С.П. Тимошенкова, Б.М. Симонова, В.Н. Горошко [9]. Авторы сосредоточены на технологических и системных методах обеспечения надежности, моделях оценки надежности. В тексте издания приведены некоторые определения надежности в порядке их появления в публикационных материалах.

Например, из определений, рассмотренных в упомянутом выше обзоре, следует обратить внимание на определение надежности как интегральной функции распределения вероятности безотказной работы от момента включения до первого отказа. Надежность в данном случае подразумевается как период безотказной работы оборудования, а не как свойство объекта, зависящее от ряда параметров. Аналогично в определении надежности как среднего времени работы системы между двумя неисправностями (то есть отказами) подразумевается длительность периода в качестве определяемого фактора. Другое определение надежности, данное в обзоре, раскрывается как способность сохранения значений в пределах установленных допусков. Именно введенный тезис о допусках представляет интерес, поскольку тем самым «закрепляется» динамичность системы и ее возможные отклонения в ту или иную сторону в допустимых пределах, что, однако, не означает снижение уровня надежности системы. Аналогичный тезис о надежности «в заданных пределах» приводится в стандарте ГОСТ Р 27.102–2021 и его предыдущих редакциях.

При этом важно упомянуть, что С.П. Тимошенков и др. отметили значительное снижение упоминания термина «надежность» в разрезе качества в начале 2000-х гг.: «В книгах по качеству надежность занимает около 5% содержания, а то и вообще отсутствует». Это не

теряет своей актуальности и сейчас – зачастую в современных публикациях, научных исследованиях, учебных материалах и проч. авторы ссылаются на классические, устоявшиеся подходы и определения в теории надежности, или же совсем не дают пояснения.

Таблица 1 – Определения надежности оборудования

№ п/п	Определение	Год, источник, авторы
<b>Отечественные источники</b>		
	<p><b>Надежность (объекта)</b> – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.</p> <p><i>Примечание – Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.</i></p>	<p>ГОСТ Р 27.102–2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения (взамен ГОСТ 27.002–2015) title:"ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения (взамен ГОСТ 27.002–2015)» Термины и определения (или его сокращения)» pdf"file:///C:/Users/.../ГОСТ Р 27.102–2021.pdf том числе с незначительными изменениями / сокращениями, используется в [10–26]</p>
	<p><b>Надежность</b> – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.</p> <p><i>Примечания</i></p> <p>1 Слова «во времени» означают естественный ход времени, в течение которого имеет место применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование объекта, а не какой-либо конкретный интервал времени.</p> <p>2 Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств.</p> <p>3 Требуемые функции и критерии их выполнения устанавливаются в нормативной, конструкторской, проектной, контрактной или иной документации на объект (далее – документации).</p> <p>4 Критерии выполнения требуемых функций могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность ее выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров. В этом случае надежность можно определить, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.</p>	<p>ГОСТ 27.002–2015 Надежность в технике. Термины и определения [27]</p>
	<p><b>Надежность</b> – вероятность выполнения механизмом своей функции в течение определенного времени или определенного ресурса.</p>	<p>Автореферат диссертации на тему «Оценка надежности участников инвестиционно-строительных проектов как элементов организационной структуры», Воронков И. Е., :"[28]", "plainCitation": "[28]", "n</p>
	<p><b>Надежность</b> – способность объекта выполнять свои функции в течении установленного срока службы.</p>	<p>Автореферат диссертации на тему «Надежность многоэлементных стержневых систем инженерных конструкций», Мкртычев О. В., 2000 [29]</p>
	<p><b>Параметрическая надежность технологического оборудования</b> – способность технологического оборудования сохранять в заданных</p>	<p>Иванников С.Н., Манасюков И.В., 2016 [3]</p>

	пределах и во времени значения выходных параметров, определяющих показатели качества изготавливаемых деталей, требования к которым непрерывно возрастают.	
	<b>адежность технологического процесса</b> – свойство обеспечивать изготовление продукции в заданном объеме, сохраняя во времени установленные требования к ее качеству. <b>адежность</b> – свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания.	Правиков Ю. М., Муслина Г. Р., 2015 [30]
	<b>Надежность машины или системы</b> – способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени и при определенных условиях применения	Шишмаев В.Ю, 2010, 2024 ionID": "Hberum5w", "properties": {"formattedCitation": "[31; 32]", "plainCitation": "[31; 32]"}]
	<b>Надежность технической системы</b> – вероятность сохранения системой работоспособности в течение определенного времени.	Андреев А.В., Яковлев В.В., Короткая Т.Ю., 2018 [33]
	<b>Надежность (<math>\approx</math> безотказность в узком смысле)</b> – свойство системы (узла, элемента) выполнять задание (свои функции) в установленном объеме при заданных условиях эксплуатации. <b>Надежность (в широком смысле)</b> – свойство системы, обусловленное ее безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью и обеспечивающее нормальное выполнение заданных функций системы.	Щипицын А.Г., Кошечев А.А., Алёшин Е.А., 2007 [34]
	<b>Надежность</b> – это сложное понятие, включающее в себя характеристики совокупности свойств, определяющих пригодность объекта к нормальной эксплуатации. К их числу относятся такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.	Королев П.С., Полесский С.Н., Цветков В.Э. и др., 2023 ,"plainCitation": "[4]", "noteIndex": 0}, "citationItems": [{"id": 7807, "uris": ["http://zotero.org/users
	<b>Надежность</b> – свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания. Примечание – Данный термин используют только для общего не количественного описания надежности	Любимов А.К., 2014 [6]
	<b>Надежность</b> – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, которые определяют его способность выполнять требуемые функции, если соблюдаются расчетные режимы работы и необходимые условия обслуживания	Проничев Н. Д., Шулепов А.П., 2011 [5]
	<b>Эксплуатационная надежность системы (устройства)</b> – свойство безотказно работать в течение определенного времени в заданных условиях при соблюдении установленных нормами мер обслуживания и текущего ремонта.	Северцев Н.А, 2018 [35]
<b>Зарубежные источники</b>		
	<b>Надежность</b> – вероятность того, что устройство/механизм будет соответствовать заданным стандартам производительности и достигать желаемые результаты в течение определенного периода времени при определенных (внешних) условиях. <i>Reliability is the probability that a device will meet the intended standards of performance and deliver the desired results within a specified period of time under specified (environmental) conditions.</i>	P o k o r n i  S . J
	<b>Надежность</b> – степень работоспособности элементов общей электрической системы, которая обеспечивает подачу электроэнергии потребителям в соответствии с принятыми стандартами и в желаемом объеме. <i>Reliability: The degree of performance of the elements of the bulk electric system that results in electricity being delivered to customers within accepted standards and in the amount desired.</i>	Reliability of Electric Utility Distribution Systems: EPRI White Paper, 2000 [36]
	<b>Надежность</b> – вероятность того, что объект удовлетворительно выполнит свое предназначение в течение указанного периода в процессе эксплуатации в соответствии с заданными условиями.	D h i

	<i>Reliability. This is the probability that an item will perform its specified mission satisfactorily for the stated time when used according to the specified conditions.</i>	<p>erties": {"formattedCitation": "[37]", "plainCitation": "[37]", "not eIndex": 0}, "citationItems": [{"id": "7813", "uris": ["http://zotero.org/users/9723584/items/759VIKXF"], "itemData": {"id": "7813", "type": "book", "number-of-pages": "217", "title": "Reliability, quality, and safety for engineers", "URL": "http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/4817/1/12pdf.pdf", "author": [{"family": "Dhillon", "given": "B. S."}], "issued": {"date-parts": [{"2005"}]}}, "schema": "https://github.com/citation-style-language/schema/raw/master/csl-</p>
	<p><b>Надежность</b> – вероятность успешного функционирования систем и связанного с ними оборудования при минимальном риске износа, аварии или сбоя системы.</p> <p><i>Reliability can be regarded as the probability of successful operation or performance of systems and their related equipment, with minimum risk of loss or disaster or of system failure.</i></p>	Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design, 2009 [8]
	<p><b>Надежность</b> – характеристика объекта, выражаемая вероятностью того, что объект будет выполнять требуемую функцию в заданных условиях в течение установленного интервала времени.</p> <p>С качественной точки зрения <b>надежность</b> можно определить как способность объекта сохранять функциональность.</p> <p>В количественном отношении <b>надежность</b> определяет вероятность того, что в течение установленного интервала времени не произойдет никаких перебоев в работе.</p> <p><i>Reliability is a characteristic of an item, expressed by the probability that the item will perform its required function under given conditions for a stated time interval.</i></p> <p><i>From a qualitative point of view, reliability can be defined as the ability of the item to remain functional.</i></p> <p><i>Quantitatively, reliability specifies the probability that no operational interruptions will occur during a stated time interval.</i></p>	<p>В и р о л и н и</p> <p>A . ,  2 0 1 0</p> <p>ADDIN ZOTERO_ITEM CSL_CITATION { "citationID": "9xnr6ADw", "properties": { "formattedCitation": "[38]", "plainCitation": "[38]", "not eIndex": 0}, "citationItems": [{"id": "7815", "uris": ["http://zotero.org/users/9723584/items/R3BFWYGT"], "http://zotero.org/users/972</p>
	<b>Надежность</b> – свойство системы сохранять свои характеристики в данных условиях эксплуатации.	Автаева А., Давлеткереева Л., Муканова А., 2018 [39]
Исторический обзор определений (источник – «Основы теории надежности», С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко, 2015)		
	<p>1955—1964 гг.:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Надежность (reliability)</b> – вероятность того, что устройство выполняет свои функции в соответствии с предъявляемыми требованиями в течение заданного интервала времени.</li> <li>• <b>Надежность</b> – свойство объекта, заключающееся в выполнении им определенных задач в конкретных условиях эксплуатации.</li> </ul>	С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко, 2015 rs/9723584/items/KC8ILT5U"], "itemData": {"id": "7817", "type": "book", "event-place": "M.", "number-of-

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Надежность</b> является интегральной функцией распределения вероятности безотказной работы от момента включения до первого отказа.</li> <li>• <b>Надежность</b> – способность элемента (системы) обеспечивать и сохранять в условиях эксплуатации заданные значения обобщенных координат и передаточного коэффициента в течение определенного отрезка времени в пределах установленных допусков.</li> <li>• <b>Надежность</b> – среднее время работы данного образца между двумя неисправностями.</li> <li>• <b>Надежность</b> – это вероятность безотказной работы.</li> </ul>	
<b>Надежность</b> – свойство аппаратуры сохранять свои выходные характеристики (параметры) в определенных пределах при заданных условиях эксплуатации	С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко, 2015 properties": {"formattedCitation":
1965: Под <b>надежностью изделия</b> понимается способность изделия сохранять качество при определенных условиях эксплуатации. <b>Надежность</b> — это качество, развернутое во времени	С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко, 2015 "uris": ["http://zotero.org/users/9 B2B584/items/KC8B3U73", "http://z nDataOfBooks11965r40"] boo
<b>Надежность</b> — свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования	С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко, 2015 tp://zotero.org/users/9723584/ite f0KC8B3U73, "noteIndex": 0 d "73817", "type": "book", "event- place": "Minsk", "number-of-
<b>Надежность</b> — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования	С. П. Тимошенко, Б. М. Симонов, В. Н. Горошко, 2015 ainCitation": "[9]", "noteIndex": 0 f0KC8B3U73 [ "http://zotero.org/users/972 B584/items/KC8B3U73", "40]
<b>Надежность</b> — способность изделия выполнять требуемые функции в заданных условиях в течение заданного периода времени	ИСО 8402:1994 Управление качеством и обеспечение качества – Словарь [43]

Источник: составлено авторами по материалам

Дополнительно проведена систематизация основных положений, приведенных в рассмотренных определениях, по четырем направлениям:

пределяющее понятие (что подразумевается под надежностью в самом узком смысле – свойство, вероятность и т.п.);

арактеристики действия (надежность – свойство или вероятность какого-либо действия оборудования – сохранения, выполнения и т.п.);

арактеристики параметров действия (к чему привязано действие оборудования – к выполнению функций, сохранению значений параметров и т.п.);

арактеристики условий действия, которые, в свою очередь, разделены по времени (действие оборудования в течение заданного времени), по режимам (действие оборудования в установленных пределах) и по другим условиям.

Можно сделать вывод о том, что все рассмотренные определения включают одно из двух либо оба ключевых типа характеристик – характеристики параметра (3) и/или характеристики условий (4). Приведенные в таблице 2 характеристики определения надежности соответствуют определениям, приведенным в таблице 1.

Важно отметить, что рассмотренные определения и выделенные основные положения определений позволяют «собрать» ряд обобщающих определений надежности, однако все приведенные характеристики напрямую определяют одну ключевую цель (предназначение) отдельного оборудования в течение времени при соблюдении условий работы – выполнение заданной задачи без наступления отказа.

Таблица 2 – Сводная таблица основных положений определения надежности оборудования

<b>Определяющее понятие</b>	<b>Характеристики действия</b>	<b>Характеристики параметров действия</b>	<b>Характеристики условий действия</b>
<p><i>Надежность</i> – это:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- свойство</li> <li>- совокупность свойств</li> <li>- совокупность характеристик</li> <li>- вероятность</li> <li>- способность</li> <li>- степень</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- сохранять</li> <li>- выполнять</li> <li>- обеспечить</li> </ul> <p><i>Дополнительно:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- обеспечить изготовление продукции</li> <li>- безотказно работать с неизменными техническими характеристиками</li> <li>- удовлетворительно выполнять свое предназначение</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- значения (выходных) параметров</li> <li>- требуемые функции (в том числе в соответствии с документацией) / определенные задачи</li> <li>- безотказность</li> <li>- долговечность</li> <li>- ремонтпригодность</li> <li>- сохраняемость</li> <li>- готовность</li> <li>- показатели качества деталей, требования к которым возрастают</li> <li>- установленные требования к качеству продукции</li> <li>- нормальное выполнение заданных функций системы</li> <li>- пригодность к нормальной эксплуатации</li> <li>- соответствие заданным стандартам</li> <li>- производительности</li> <li>- достижение желаемых результатов</li> <li>- значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах</li> <li>- успешного функционирования системы</li> <li>- способность сохранять функциональность</li> <li>- способность сохранять качество</li> <li>- безотказная работа от момента включения до первого отказа</li> <li>- выходные характеристики (параметры)</li> <li>- соответствие заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения, транспортирования</li> </ul>	<p><i>По времени:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- во времени</li> <li>- в течение определенного (заданного) времени / интервала времени / отрезка времени</li> </ul> <p><i>По режимам:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в установленных (заданных, определенных) пределах</li> <li>- в заданных режимах</li> <li>- в заданных условиях применения</li> <li>- в течение установленного срока службы</li> <li>- при определенных условиях применения</li> <li>- при заданных (определенных, внешних) условиях эксплуатации</li> <li>- если соблюдаются расчетные режимы работы</li> <li>- в соответствии с предъявляемыми требованиями</li> <li>- в пределах установленных допусков</li> </ul> <p><i>По другим условиям:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в стратегиях технического обслуживания, хранения, транспортирования</li> <li>- в течение определенного ресурса</li> <li>- в заданном (установленном) объеме</li> <li>- если соблюдаются необходимые условия обслуживания</li> <li>- при соблюдении установленных нормами мер обслуживания и текущего ремонта</li> <li>- при минимальном риске износа, аварии или сбоя</li> <li>- в соответствии с принятыми стандартами и в желаемом объеме</li> </ul>

Источник: составлено авторами по материалам

Актуальным становится анализ и пересмотр устоявшихся подходов к определению надежности, измерению и оценке надежности, разработке и совершенствованию показателей надежности в соответствии с тенденциями реорганизации процессов современных производств. И, конечно, данное направление не может не быть сфокусированным на анализе возможностей применения передовых цифровых и производственных технологий в целях трансформации системы надежностного анализа и теории надежности вслед за трансформацией промышленности.

### **Надежность оборудования в условиях внедрения передовых цифровых и производственных технологий**

Рассмотренные ранее определения надежности в совокупности подразумевают оценку свойства оборудования в текущий, фиксированный момент времени. Практически все

рассмотренные определения не учитывают высокую динамичность системы в отдельный момент времени и характер непрерывности. В связи с этим зачастую теряется привязка к предназначению оценки показателя надежности.

Надежность оборудования в первую очередь должна определяться количественно, в процессе эксплуатации, на регулярной основе, при этом должна измеряться не для анализа свойств оборудования как таковых, а в целях **контроля** отказоспособности системы и **предотвращения** нарушения работы оборудования. В связи с этим предполагается целесообразным расширение определения надежности в части указания важности измеряемого свойства.

Так, **надежность оборудования** может представлять собой *количественно измеримое свойство оборудования, соответствующее уровню безотказности, то есть его способности бесперебойно выполнять заданные функции в заданных режимах работы и обслуживания, обеспечивать требуемые показатели и качество работы в заданном объеме в течение определенного времени эксплуатации, и оказывающее влияние на производственную способность предприятия.*

Данное выше определение дополнено двумя критически важными положениями. Во-первых, «количественно измеримое» и «уровень безотказности» отражает прикладную направленность надежностного анализа и предназначения оценки данного показателя. При этом данный тезис напрямую соответствует все возрастающим тенденциям внедрения платформенных решений на предприятия и наполнения оборудования измерительными устройствами (датчиками), которые способствуют контролю состояния оборудования в режиме реального времени за счет сбора и анализа поступающих значений измеряемых параметров.

Второе, не менее важное положение, предложенное в определении надежности – «оказывающее влияние на производственную способность». Этим тезисом закрепляется принципиальная важность оценки надежности (уровня безотказности), а также взаимосвязь и взаимозависимость всей производственной системы. Одно оборудование, которое потенциально может выйти из строя (то есть оборудование с недостаточным уровнем надежности), напрямую может повлечь за собой приостановку всей производственной деятельности. Необходимость внесения данного положения в определение надежности объясняется также тем, что надежность на производстве в данном случае должна быть измерима для того оборудования, которое является технологическим и участвует в процессе производства.

Важность данных положений возрастает при условии внедрения передовых цифровых и производственных технологий в деятельность производства. Как показывает практика, используемые на предприятии производственные единицы и технологии могут быть интегрированы в единую производственную систему за счет комплексного подхода к управлению ресурсами предприятия [44]. К числу инструментов, позволяют осуществить интеграцию, относят, например, ERP-системы, PDM- и SPDM-платформы и др. Однако наибольшая эффективность может быть достигнута при создании цифрового двойника оборудования или, шире, производственной системы [1; 44].

Благодаря проведению испытаний в цифровом пространстве инженеры-технологи, операторы оборудования и другой инженерно-технический персонал могут многократно проводить проверки и заранее просчитывать поведение машины, возникновение возможных отказов, моделируя с минимальными финансовыми затратами различные условия эксплуатации, в том числе более сложные, чем в жизни, процессы. Внедрение технологии цифровых двойников в систему мониторинга за состоянием оборудования позволит увеличить длительность периода между отказами оборудования.

#### **Классификация технологического оборудования в зависимости от уровня надежности**

В соответствии с классическим подходом к оценке уровня надежности, как правило, рассматривается вероятность безотказной работы оборудования и обратная ей вероятность наступления отказа. Данный подход позволяет отслеживать изменение уровня надежности и

определять наступление критического события, чему способствует сбор данных о состоянии системы и их анализ, как было отмечено выше.

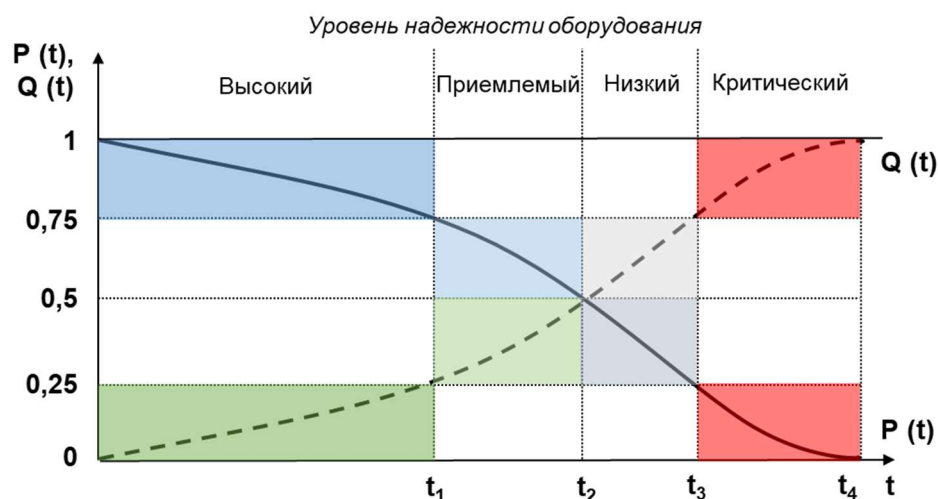
Для определения, в какой группе риска находится эксплуатируемое оборудование и уровень надежности каких единиц принципиально важно отслеживать, следует разработать классификацию состояния технологического оборудования в зависимости от уровня его надежности. В рамках проведенного анализа предложена следующая классификация оборудования, которая наглядно продемонстрирована на Рисунке 1. Стоит отметить, что приведенная классификация является условной и может быть адаптирована под особенности конкретного производственного участка.

Высокий уровень надежности. Как правило, к данной группе относится оборудование, недавно введенное в эксплуатацию или редко используемое (с низкой загрузкой). Уровень надежности такого оборудования может быть рассмотрен как оценка вероятности безотказной работы  $P_i \geq 0,75$ , или вероятности отказа  $Q_i \leq 0,25$ .

Приемлемый (средний, достаточный, удовлетворительный) уровень надежности. Такое оборудование может некоторое время находиться в эксплуатации, при этом следует проводить регулярное техническое обслуживание этого оборудования. В некоторых случаях к данной группе оборудования можно отнести оборудование после восстановительного, капитального ремонта. Вероятность безотказной работы такого оборудования составляет  $0,5 \leq P_i < 0,75$ , вероятность выхода из строя (вероятность отказа) –  $0,25 < Q_i \leq 0,5$ . Очевидно, что к данной группе оборудования можно отнести большинство единиц техники, поскольку теоретическая вероятность наступления любого события равна 0,5, однако в данном случае не учитываются факторы производства, которые могут оказать существенное влияние на то или иное значение вероятности – в рамках проанализированных определений такими факторами являются условия эксплуатации, заданные режимы, допуски, а также уровень загрузки оборудования и проч.

Низкий (неприемлемый) уровень надежности. В данную группу оборудования следует отнести те единицы оборудования, вероятность безотказной работы которых составляет  $0,25 \leq P_i < 0,5$ , вероятность отказа, в свою очередь, равна значению в диапазоне  $0,5 < Q_i \leq 0,75$ . Оборудование, которое входит в данную группу, является опасным для эксплуатации и должно находиться под регулярным контролем – его следует тщательно осматривать, обслуживать, проводить необходимые ремонтные работы. В крайнем случае, оно может подлежать замене, и в целях поддержания высокого уровня готовности производственного участка следует минимизировать число единиц оборудования данной группы.

Критический уровень надежности. Оборудование данной группы обладает низкой вероятностью безотказной работы  $P_i < 0,25$  и высокой вероятностью отказа  $Q_i > 0,75$ . Выход оборудования из строя может привести к неисправимой поломке оборудования, и проводимое техническое обслуживание практически не повышает уровень безотказности.



*Рисунок 1 – Модель классификации технологического оборудования в соответствии с уровнем надежности – вероятностью безотказной работы (Р) и отказа оборудования (Q) (Источник: составлено авторами)*

Таким образом, проведенная работа позволяет сформировать план мероприятий по увеличению надежности всего производственного парка конкретного предприятия на основании внедрения подходов к оценке надежности, что позволит повысить готовность производства и обеспечит формирование технологического лидерства промышленности.

### **Заключение**

В работе рассмотрены отечественные и зарубежные определения надежности оборудования и проведена их систематизация. На основе проведенного исследования предложено определение надежности, учитывающее актуальные направления развития предприятий и необходимость количественного анализа показателей надежности, которые, как правило, включают оценку вероятности отказа оборудования и безотказной работы. На основании вероятности отказа и безотказности предложена классификация технологического оборудования. Таким образом, поставленные в исследовании задачи достигнуты.

Внедрение методологий управления надежностью оборудования в деятельность промышленных предприятий будет способствовать обеспечению надежности всей системы, в том числе за счет цифровой трансформации, что является существенным фактором развития для предприятий общего машиностроения. Это позволит повысить уровень качества производственных процессов, снизить сроки и стоимость вывода продукции на рынок за счет внедрения платформенных решений на этапы разработки и производства изделий, повысить эффективность технического обслуживания и ремонта [45; 46].

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Корниенко А.В. Математическая модель качества производственного процесса / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума. – 2023. – С. 14-21.
2. ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения». – URL: [gost/75917/](http://gost.75917/) (дата обращения: 10.07.2024).
3. Иванников С.Н. Параметрическая надежность технологического оборудования / С.Н. Иванников, И.В. Манаенков // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – № 4 (25). – С. 57-58.
4. Королев П.С. Основы надежности вычислительных систем / П.С. Королев, С.Н. Полесский, В.Э. Цветков. – Москва: КНОРУС, 2023. – 182 с.
5. Проничев Н.Д. Технологические методы обеспечения надежности двигателей летательных аппаратов / Н.Д. Проничев, А.П. Шулепов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2011.
6. Любимов А.К. Введение в теорию надёжности: проектно-ориентированный подход / А.К. Любимов. – Нижний Новгород, 2014. – 176 с.
7. Pokorni S. Data-driven reliability and availability of electronic equipment / S. Pokorni // Vojnotehnički Glasnik / Military Technical Courier. – 2023. – Т. 71. – № 3. – С. 769-782.
8. Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design. – 2009.
9. Тимошенко С.П. Основы теории надежности / С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 445 с.
10. Павлов П.П. Основы теории надежности электромеханических комплексов / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – 92 с.
11. Корчагин А.Б. Надежность технических систем и техногенный риск: в 2 ч. Ч. 1: Основы теории / А.Б. Корчагин, В.С. Сердюк, А.И. Бокарев. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 228 с.
12. Галкин А.Г. Основы теории надежности / А.Г. Галкин, А.А. Ковалев. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 134 с.
13. Атапин В.Г. Основы теории надежности / В.Г. Атапин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 94 с.
14. Морозов Н.А. Надежность технических систем / Н.А. Морозов. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2019. – 105 с.
15. Викторова В.С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. – Изд. 2-е, испр. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 256 с.
16. Журавлев С.Ю. Надежность технических систем / С.Ю. Журавлев. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. – 331 с.
17. Шкляр В.Н. Надёжность систем управления / В.Н. Шкляр. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 126 с.

18. Аполлонский С.М. Надежность и эффективность электрических аппаратов / С.М. Аполлонский, Ю.В. Куклев. – СПб: Издательство «Лань», 2011. – 448 с.
19. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Часть 1: Основы теории / Е.В. Сугак. – СПб: Издательство «Лань», 2023. – 276 с.
20. Сугак Е.В. Прикладная теория надежности. Часть 2: Надежность технических систем / Е.В. Сугак. – СПб: Издательство «Лань», 2023. – 240 с.
21. Скиба Д.В. Совершенствование системы ТОИР на примере промышленного предприятия / Д.В. Скиба, Ю.В. Литовская // Экономика и политика. – 2021. – № 1 (17). – С. 30-34.
22. Токликишвили А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск / А.Г. Токликишвили. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2019. – 65 с.
23. Лянденбургский В.В. Основы теории надежности / В.В. Лянденбургский, А.С. Иванов, А.С. Ширшиков. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 228 с.
24. Основы теории надежности / А.В. Чепурин [и др.]. – М., 2023. – 232 с.
25. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск / Р.А. Шубин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с.
26. Белоусов А.И. Оценка надежности лопатки и рабочего колеса на этапе проектирования с использованием пакета ANSYS / А.И. Белоусов, А.В. Грицин, А.А. Романов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 80 с.
27. ГОСТ 27.002–2015 Надежность в технике. Термины и определения. – URL: <https://internet-gost/62713/> (дата обращения: 10.07.2024).
28. Воронков И.Е. Оценка надежности участников инвестиционно-строительных проектов как элементов организационной структуры / И.Е. Воронков. – 2018.
29. Мкртычев О.В. Надежность многоэлементных стержневых систем инженерных конструкций / О.В. Мкртычев. – 2000.
30. Правиков Ю.М. Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 122 с.
31. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем / В.Ю. Шишмарев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
32. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем / В.Ю. Шишмарев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2024. – 289 с.
33. Андреев А.В. Теоретические основы надежности технических систем / А.В. Андреев, В.В. Яковлев, Т.Ю. Короткая. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 164 с.
34. Щипицын А.Г. Элементы прикладной теории надежности / А.Г. Щипицын, А.А. Кошечев, Е.А. Алешин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 114 с.
35. Северцев Н.А. Теория надежности сложных систем в отработке и эксплуатации / Н.А. Северцев. – 2-е изд., пер. и доп. – Издательство Юрайт, 2018. – 436 с.
36. Reliability of Electric Utility Distribution Systems: EPRI White Paper. – 2000.
37. Dhillon B.S. Reliability, quality, and safety for engineers / B.S. Dhillon. – 2005. – 217 с.
38. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice / A. Birolini. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 610 с.
39. Автаева А. Надежность систем: тестирование и защита информации: 1 часть / А. Автаева, Л. Давлеткереева, А. Муканова. – Алматы: ССК, 2018. – 324 с.
40. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М., 1965. – 524 с.
41. ГОСТ 13377-75 Надежность в технике. Термины и определения. – URL: [pdf](#) (дата обращения: 26.08.2024).
42. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – URL: [h](#)
43. ИСО 8402:1994 Управление качеством и обеспечение качества – Словарь. – URL: [t](#)
44. Мартынец Е.Р. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. [p](#)
45. Мартынец Е.Р. Эффективность применения технологии разработки цифровых двойников в промышленности / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Качество образования и устойчивое развитие – основа международного сотрудничества: Материалы конференции Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках программы Петербургского Международного экономического форума. – 2024. – С. 281-287.
46. Мартынец Е.Р. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2024. – № 1. – С. 72-78.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург  
Инженер лаборатории «Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования», аспирант Института передовых производственных технологий 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б  
E-mail: kornienkoav1997@mail.ru

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург  
Ведущий специалист отдела технологического и промышленного форсайта Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг», аспирант Института передовых производственных технологий 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б  
E-mail: katya\_martynets@inbox.ru

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург  
К.э.н., доцент, директор Института передовых производственных технологий 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 литера Б  
E-mail: vlevantsov@spbstu.ru

---

KORNIENKO A.V., MARTYNETS E.R., LEVENTSOV V.A.

## **OVERVIEW OF APPROACHES TO THE DEFINITION OF "EQUIPMENT RELIABILITY". CLASSIFICATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT DEPENDING ON THE RELIABILITY LEVEL**

**Abstract.** *The article discusses well-established approaches to determining the reliability of equipment - in a narrow sense, this is the property of equipment to maintain operability under certain conditions. However, current trends in the formation of the data economy, the application of information systems into industry and the response to emerging geopolitical and economic challenges lead to the need to reorganize processes related to the control and management of the reliability of the entire manufacturing system. In this regard, based on the analyzed definitions, the main features laid down by the authors in the definition of reliability are systematized. Based on the identified systematized factors, a definition of reliability is proposed, which takes into account the transformation of industrial enterprises. In addition, the possibility of applying digital twins technology as a monitoring tool and improving the reliability of equipment was considered as a subject for discussion. At the same time, it is noted that the reliability of equipment as a quantifiable indicator is primarily associated with two reciprocal indicators – the probability of failure-free operation of equipment and the probability of equipment failure. Based on the work carried out, a classification of technological equipment is proposed depending on the level of reliability, where a high, acceptable, low and critical level of reliability is highlighted.*

**Keywords:** *reliability, equipment, failure, failure-free, operation, probability, digital technologies, digital twin.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Kornienko A.V. Matematicheskaya model kachestva proizvodstvennogo protsessa / A.V. Kornienko, E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Upravlenie kachestvom produktii na osnove peredovykh proizvodstvennykh tekhnologii: Sbornik tezisev dokladov V Mezhdunarodnogo foruma. – 2023. – S. 14-21.
2. GOST R 27.102–2021 «Nadezhnost v tekhnike. Nadezhnost ob'ekta. Terminy i opredeleniya». – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75917/> (data obrashcheniya: 10.07.2024).
3. Ivannikov S.N. Parametricheskaya nadezhnost tekhnologicheskogo oborudovaniya / S.N. Ivannikov, I.V. Manaenkov // Evraziiskii Soyuz Uchenykh. – 2016. – № 4 (25). – S. 57-58.
4. Korolev P.S. Osnovy nadezhnosti vychislitelnykh sistem / P.S. Korolev, S.N. Polesskii, V.E. Tsvetkov. – Moskva: KNORUS, 2023. – 182 s.
5. Pronichev N.D. Tekhnologicheskie metody obespecheniya nadezhnosti dvigatelei letatelnykh apparatov / N.D. Pronichev, A.P. Shulepov. – Samara: Samar. gos. aerokosm. un-t im. S. P. Koroleva, 2011.
6. Lyubimov A.K. Vvedenie v teoriyu nadezhnosti: proektno-orientirovannyi podkhod / A.K. Lyubimov. – Nizhnii Novgorod, 2014. – 176 s.
7. Pokorni S. Data-driven reliability and availability of electronic equipment / S. Pokorni // Vojnotehnički Glasnik / Military Technical Courier. – 2023. – T. 71. – № 3. – S. 769-782.
8. Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design. – 2009.
9. Timoshenkov S.P. Osnovy teorii nadezhnosti / S.P. Timoshenkov, B.M. Simonov, V.N. Goroshko. – M.: Izdatelstvo Yurait, 2015. – 445 s.
10. Pavlov P.P. Osnovy teorii nadezhnosti elektromekhanicheskikh kompleksov / P.P. Pavlov, R.S. Litvinenko. – Kazan: Kazan. gos. energ. un-t, 2017. – 92 s.
11. Korchagin A.B. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk: v 2 ch. Ch. 1: Osnovy teorii / A.B. Korchagin, V.S. Serdyuk, A.I. Bokarev. – Omsk: Izd-vo OmGTU, 2011. – 228 s.

12. Galkin A.G. Osnovy teorii nadezhnosti / A.G. Galkin, A.A. Kovalev. – Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2014. – 134 s.
13. Atapin V.G. Osnovy teorii nadezhnosti / V.G. Atapin. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2017. – 94 s.
14. Morozov N.A. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem / N.A. Morozov. – Orenburg: Orenburgskii gos. un-t, 2019. – 105 s.
15. Viktorova V.S. Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem / V.S. Viktorova, A.S. Stepanyants. – Izd. 2-e, ispr. – M.: LENAND, 2016. – 256 s.
16. Zhuravlev S.Yu. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem / S.Yu. Zhuravlev. – Krasnoyarsk: Krasnoyar. gos. agrar. un-t, 2013. – 331 s.
17. Shklyar V.N. Nadezhnost sistem upravleniya / V.N. Shklyar. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. – 126 s.
18. Apollonskii S.M. Nadezhnost i effektivnost elektricheskikh apparatov / S.M. Apollonskii, Yu.V. Kuklev. – SPb: Izdatelstvo «Lan», 2011. – 448 s.
19. Sugak E.V. Prikladnaya teoriya nadezhnosti. Chast 1: Osnovy teorii / E.V. Sugak. – SPb: Izdatelstvo «Lan», 2023. – 276 s.
20. Sugak E.V. Prikladnaya teoriya nadezhnosti. Chast 2: Nadezhnost tekhnicheskikh sistem / E.V. Sugak. – SPb: Izdatelstvo «Lan», 2023. – 240 s.
21. Skiba D.V. Sovershenstvovanie sistemy TOIR na primere promyshlennogo predpriyatiya / D.V. Skiba, Yu.V. Litovskaya // Ekonomika i politika. – 2021. – № 1 (17). – S. 30-34.
22. Toklikishvili A.G. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk / A.G. Toklikishvili. – Vladivostok: Dalnevost. federal. un-t, 2019. – 65 s.
23. Lyandenburskii V.V. Osnovy teorii nadezhnosti / V.V. Lyandenburskii, A.S. Ivanov, A.S. Shirshikov. – Penza: PGUAS, 2014. – 228 s.
24. Osnovy teorii nadezhnosti / A.V. Chepurin [i dr.]. – M., 2023. – 232 s.
25. Shubin R.A. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyi risk / R.A. Shubin. – Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012. – 80 s.
26. Belousov A.I. Otsenka nadezhnosti lopatki i rabocheho kolesa na etape proektirovaniya s ispolzovaniem paketa ANSYS / A.I. Belousov, A.V. Gritsin, A.A. Romanov. – Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2007. – 80 s.
27. GOST 27.002–2015 Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62713/> (data obrashcheniya: 10.07.2024).
28. Voronkov I.E. Otsenka nadezhnosti uchastnikov investitsionno-stroitelnykh proektov kak elemen-tov organizatsionnoi struktury / I.E. Voronkov. – 2018.
29. Mkrtychev O.V. Nadezhnost mnogoelementnykh sterzhnevnykh sistem inzhenernykh konstruksii / O.V. Mkrtychev. – 2000.
30. Pravikov Yu.M. Osnovy teorii nadezhnosti tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii / Yu.M. Pravikov, G.R. Muslina. – Ulyanovsk: UIGTU, 2015. – 122 s.
31. Shishmarev V.Yu. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem / V.Yu. Shishmarev. – M.: Izdatelskii tsentr «Akademiya», 2010. – 304 s.
32. Shishmarev V.Yu. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem / V.Yu. Shishmarev. – 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Izdatelstvo Yurait, 2024. – 289 s.
33. Andreev A.V. Teoreticheskie osnovy nadezhnosti tekhnicheskikh sistem / A.V. Andreev, V.V. Yakovlev, T.Yu. Korotkaya. – SPb: Izd-vo Politekh. un-ta, 2018. – 164 s.
34. Shchipitsyn A.G. Elementy prikladnoi teorii nadezhnosti / A.G. Shchipitsyn, A.A. Koshcheev, E.A. Aleshin. – Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2007. – 114 s.
35. Severtsev N.A. Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem v otrabotke i ekspluatatsii / N.A. Severtsev. – 2-e izd., per. i dop. – Izdatelstvo Yurait, 2018. – 436 s.
36. Reliability of Electric Utility Distribution Systems: EPRI White Paper. – 2000.
37. Dhillon B.S. Reliability, quality, and safety for engineers / B.S. Dhillon. – 2005. – 217 s.
38. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice / A. Birolini. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 610 s.
39. Avtaeva A. Nadezhnost sistem: testirovanie i zashchita informatsii: 1 chast / A. Avtaeva, L. Davletkereeve, A. Mukanova. – Almaty: SSK, 2018. – 324 s.
40. Gnedenko B.V. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskii analiz / B.V. Gnedenko, Yu.K. Belyaev, A.D. Solov'ev. – M., 1965. – 524 s.
41. GOST 13377-75 Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/594/59465.pdf> (data obrashcheniya: 26.08.2024).
42. GOST 27.002-89 Nadezhnost v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/112/11290.pdf> (data obrashcheniya: 26.08.2024).
43. ISO 8402:1994 Upravlenie kachestvom i obespechenie kachestva – Slovar. – URL: <https://forpm.ru/uploads/iso-8402-94.pdf>.
44. Martynets E.R. Sistema kompleksnykh tekhnologicheskikh reshenii s primeneniem tsifrovyykh dvoynikov proizvodstva / E.R. Martynets, A.V. Kornienko, V.A. Leventsov // Gorizonty ekonomiki. – 2022. – № 6 (72). – S. 68-74.
45. Martynets E.R. Effektivnost primeneniya tekhnologii razrabotki tsifrovyykh dvoynikov v promyshlennosti / E.R. Martynets, V.A. Leventsov // Kachestvo obrazovaniya i ustoichivoe razvitie – osnova mezhdunarodnogo

sotrudnichestva: Materialy konferentsii Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo v ramkakh programmy Peterburgskogo Mezhdunarodnogo ekonomicheskogo foruma. – 2024. – S. 281-287.

46. Martynets E.R. Protsessnaya model tekhnicheskoi podgotovki proizvodstva s fokusirovkoi na tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov / E.R. Martynets, A.V. Kornienko, V.A. Leventsov // Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya 4: Promyshlennyye tekhnologii. – 2024. – № 1. – S. 72-78.

**Kornienko Alexandr Vladimirovich**

Peter the Great St.Petersburg  
Polytechnic University,  
St.Petersburg  
Engineer of Modeling of  
technological processes and design  
of power equipment laboratory,  
post-graduate student of the SPbPU  
Institute of Advanced  
Manufacturing Technologies  
195251, St.Petersburg, 29  
Politechnicheskaya str., litera B  
E-mail: kornienkoav1997@mail.ru

**Martynets Ekaterina Romanovna**

Peter the Great St.Petersburg  
Polytechnic University, St.Petersburg  
Leading specialist of Technological  
and Industrial Foresight Department  
of the SPbPU School of Advanced  
Engineering Studies in Digital  
Engineering, post-graduate student of  
the SPbPU Institute of Advanced  
Manufacturing Technologies  
195251, St.Petersburg, 29  
Politechnicheskaya str., litera B  
E-mail: katya\_martynets@inbox.ru

**Leventsov Valery Alexandrovich**

Peter the Great St.Petersburg  
Polytechnic University,  
St.Petersburg  
PhD (Economics), Associate  
Professor, Director of the SPbPU  
Institute of Advanced  
Manufacturing Technologies  
195251, St.Petersburg, 29  
Politechnicheskaya str., litera B  
E-mail: vleventsov@spbstu.ru

© Корниенко А.В., Мартынец Е.Р., Левенцов В.А., 2025

# **XXII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК"**

УДК 621.365.69

DOI: 10.33979/2073-7408-2025-369-1-112-117

КАЧАНОВ А.Н., ТИМОХИН В.А., КАЧАНОВ Н.А.

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ШПОНА**

**Аннотация.** В статье рассмотрена индукционная установка для сушки шпона с бегущим электромагнитным полем и приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований её работы по сравнению с другими сушильными установками, использующими в качестве теплового агента воздух и газ. Показаны преимущества использования бегущего электромагнитного поля для получения равномерного нагрева ферромагнитного барабана и выявлены факторы, влияющие на скорость его вращения. При оценке энергоэффективности работы индукционной установки показаны её преимущества по сравнению с другими сушильными агрегатами, также обеспечивающими сушку строганного шпона толщиной от 0,3 до 4 мм в диапазоне рабочих температур от 80 до 190 градусов Цельсия. Обоснована оптимальная толщина стенки ферромагнитного цилиндрического барабана, обеспечивающей равномерный нагрев и как следствие качество высушиваемого шпона.

**Ключевые слова:** индукционная установка, бегущее электромагнитное поле, сушка шпона, влажность, коробление, гофрность, сеть промышленной частоты, вектор Пойнтинга, энергоэффективность.

### **Введение**

В настоящее время задачи, определенные Федеральным законом РФ от 23.11.09 г. № 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" не утратили своей актуальности. Поскольку они направлены на дальнейшее повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, в том числе и электроэнергии. Для решения поставленных задач требуется разработка, совершенствование и внедрение электрооборудования и энергоэффективных технологических процессов в различные области экономики. К технологическим процессам, требующим больших затрат электроэнергии, можно отнести сушку волокнистых материалов, например, шпона из различных пород древесины.

### **Анализ**

Известно, что строганный шпон используют как облицовочный материал в мебельном производстве, а лущенный шпон применяют для изготовления фанеры и древесностроительных материалов [1,2]. Хорошее качество склеивания шпона ценных пород древесины с поверхностью ДСП достигается предварительным высушиванием до определенной конечной влажности от 7 до 12 %. Влажность шпона изменяется в широких пределах от 60 до 150-180 % в зависимости от породы древесины и способа доставки на деревообрабатывающие предприятия. Следует также учитывать и геометрические особенности листового шпона, а именно малую толщину (от 0,3 до 4 мм) по сравнению с большой площадью его поверхности. Сделанные замечания необходимо учитывать при выборе способа подвода теплоты к высушиваемому шпону. Способ при небольшой продолжительности сушки (до нескольких минут) должен обеспечивать высокую скорость удаления влаги при исключении возможного коробления листа шпона в процессе его усушки.

Сегодня в мировой практике для сушки шпона используют различные сушильные устройства, которые по способу подвода теплоты делятся на три группы: кондуктивные, конвективно-кондуктивные и конвективные. В России широкое применение нашли устройства, входящие в первую и вторую группу, т.к. устройства, реализующие третий способ передачи теплоты, имеют низкий КПД.

### Основная часть

В статье приведены результаты исследований, направленные на повышение энергоэффективности работы индукционной установки для сушки шпона для шпона и длинномерных волокнистых материалов [3] с бегущим электромагнитным полем (БЭМП). Общий вид рассматриваемого устройства приведен на рисунке 1. По способу подвода теплоты к шпону устройство следует отнести ко второй группе сушильных устройств, из трех указанных выше.

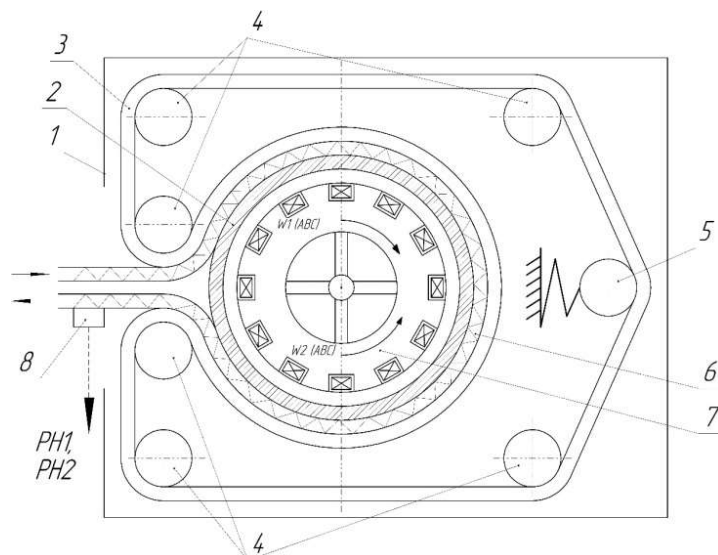


Рисунок 1 – Общий вид сушилки для шпона и длинномерных волокнистых материалов

Устройство, представленное на рисунке 1 содержит камеру 1 и размещенные в ней цилиндрический, свободно вращающийся относительно центральной оси, ферромагнитный барабан 2, газопроницаемую бесконечную ленту 3, с направляющими 4 и натяжным 5 валиками, а также жестко закрепленный индуктор 7. Газопроницаемая бесконечная лента образует с рабочей поверхностью барабана зазор, который служит для размещения в нем высушиваемого шпона (волокнистого материала) 6. Индуктор состоит из цилиндрического магнитопровода в пазах которого уложены две равномерно распределенные, но электрически не связанные между собой трехфазные обмотки 9 и 10. Паза магнитопровода обращены зубцовым слоем к внутренней поверхности барабана 2. Датчик 8 обеспечивает контроль влажности (температуры) высушиваемого материала. Электрическая схема подключения обмоток индуктора к сети переменного трехфазного тока промышленной частоты через регуляторы напряжения 11 и 12 приведена на рисунке 2.

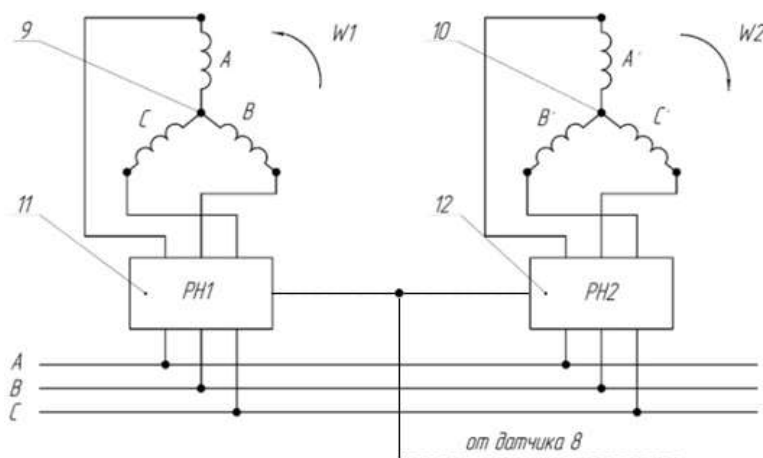


Рисунок 2 – Электрическая схема подключения обмоток индуктора к питающей сети

Устройство работает следующим образом. При подключении обмоток индуктора к сети возникают два встречно бегущих электромагнитных поля ( $W1(ABC)$  и  $W2(ACB)$ ). Электромагнитные волны, проникая вглубь барабана, наводят в нем ЭДС и вызывают появление вихревых токов, которые не только нагревают барабан, но и обеспечивают его вращение за счет взаимодействия этого тока с внешним магнитным полем. Теплота от поверхности барабана передается путем теплопередачи высушиваемому шпону, который плотно фиксируется на его поверхности газопроницаемой бесконечной лентой с помощью натяжного валика 5. Интенсивность нагрева и скорость вращения барабана можно регулировать путем изменения интенсивности бегущих электромагнитных полей, создаваемых каждой из двух обмоток индуктора, а также регулированием их влияния друг на друга. Например, обмотка 9 задает направление вращения барабана в направлении  $W1(ABC)$ , а обмотка 10 обеспечивает режим электромагнитного тормоза, так как созданное ею бегущее электромагнитное поле  $W2(ACB)$  имеет встречное направление вращения за счет несовпадения последовательности чередования фаз в одноименных обмотках индукторов. Данная установка обеспечивает равномерный нагрев ферромагнитного барабана и, как следствие, плотно прилегающего к нему высушиваемого шпона. Контроль влажности (температуры) материала осуществляется на выходе из индукционной установки с помощью датчика 8, сигнал от которого поступает на регуляторы напряжения 11 и 12. Для того чтобы обеспечить нормальную работу установки величина напряжения на обмотке 9 должна быть больше напряжения, приложенного к обмотке 10. При этом результирующая МДС ( $F_{\Sigma} = F_1 \pm F_2$ ) должна обеспечивать такую скорость вращения барабана, при которой за один его оборот содержание влажности в шпоне снижается до заданной конечной величины. В случае равенства  $F_1 = F_2$  барабан находится в состоянии покоя. [4,5].

Результирующее электромагнитное поле можно классифицировать как квазистационарное магнитное поле, синусоидально меняющееся во времени в каждой точке пространства, причем все точки, имеющие одинаковую амплитуду и фазу колебания во времени, перемещаются в пространстве с одинаковой скоростью  $v$  [6,7]. Другими словами, такое поле не имеет ни начала, ни конца, т.е. оно простирается из бесконечности в бесконечность.

Скорость результирующего бегущего электромагнитного поля является фазовой скоростью и зависит только от частоты тока, возбуждающего это поле, и от геометрического распределения его в пространстве [7]:

$$v = \frac{\omega}{\alpha}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота тока индуктора;

$\alpha = \pi/\tau$  – параметр, определяемый длиной пространственной полуволны;

$\tau$  – полюсное деление.

По обмоткам индуктора  $W1$  и  $W2$ , подключенным к промышленной сети 3-х фазного переменного тока текут токи, изменяющиеся по синусоидальному закону:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_{Am} \sin \omega t \\ i_B &= I_{Bm} \sin (\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= I_{Cm} \sin (\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При выборе оптимальной толщины стенки цилиндрического барабана было принято решение упростить конструкцию рассматриваемого устройства. Если мысленно разрезать по образующей полый цилиндр 2 (см. рисунок 1) и развернуть его в полуограниченную плоскость, а затем разместить относительно этой плоскости также развернутый индуктор 7, то расчетная модель приобретает более простой вид, приведенный на рисунке 3. В упрощенном варианте поставленная задача решается достаточно просто путем использования хорошо известного из теории индукционного нагрева метода «Падение плоской электромагнитной волны на полуограниченное металлическое тело с плоской поверхностью» [8, 9]. Энергию, передаваемую электромагнитной волной в металлическое тело можно рассчитать по формуле Пойнтинга:

$$\dot{S} = \frac{1}{2} [\dot{E} H^*] \quad (3)$$

где  $\vec{E}$  и  $\vec{H}^*$  – комплексные значения векторов напряженности электрического и магнитного полей изменяющиеся по синусоидальному закону (2).

На рисунке 4 приведен график относительных значений модулей  $\vec{E}/E_0$  и  $\vec{H}/H_0$  в металлическом полуограниченном теле. Из графика следует, что эти параметры по мере проникновения электромагнитной волны  $S$  в тело затухают по экспоненциальному закону. В точке  $A$ , соответствующей по оси  $Z$  координате  $\Delta = Z_i / \Delta_3 = 1,0$  в слое металла толщиной  $\Delta_3 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$  выделяется в виде теплоты 86% энергии электромагнитной волны.

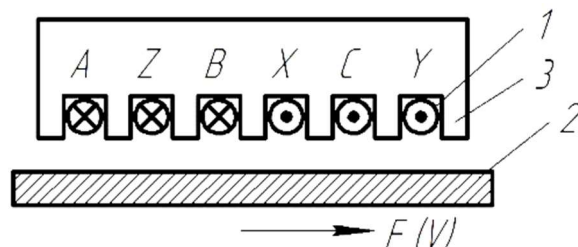


Рисунок 3 – Эскиз расчетной модели установки:

1 - обмотка индуктора; 2- полуограниченная плоскость; 3 – магнитопровод

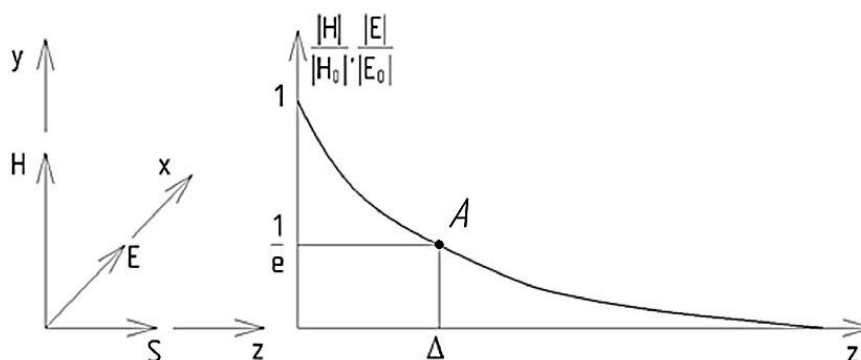


Рисунок 4 – График относительных значений модулей  $\vec{E}/E_0$  и  $\vec{H}/H_0$  в металлическом полуограниченном теле:

$H_0$  и  $E_0$  – значения напряженности магнитного и электрического полей на поверхности тела

Из анализа кривой приведенной на рисунке 4 следует, что оптимальная толщина стенки цилиндрического ферромагнитного барабана 2 должна быть равна  $1,3\Delta_3$ . Оптимальная толщина стенки стального барабана обеспечивает получение однородного температурного поля как по объему, так и по рабочей поверхности барабана. Последнее в сочетании с конструктивными элементами для жесткой фиксации листов шпона на рабочей поверхности барабана позволяют не только повысить энергоэффективность устройства, но улучшить качество выпускаемой продукции путем исключения возможного появления нежелательных дефектов в виде коробления и гофристости поверхности шпона в результате его усушки.

При выборе оптимальной толщины стенки цилиндрического ферромагнитного барабана были также исследованы и учтены изменения электрофизических свойств материала барабана в диапазоне температур от 80 до 190 градусов Цельсия. Выбор величины температуры зависит от толщины шпона и рекомендуемого времени его сушки в зависимости от породы древесины. В таблице 1 приведены средние значения продолжительности сушки, например березового шпона, полученные на основании теоретических расчетов и проверенные экспериментальным путем на физической модели индукционной установки с БЭМП. Там же с целью сопоставления эффективности работы индукционной установки с БЭМП по сравнению с другими сушилками, использующими в качестве сушильного агента воздух и газ, приведены сведения о времени продолжительности в них процесса сушки березового шпона от начальной влажности 90% до конечной влажности  $6 \div 8 \%$  [1].

## Заключение

Из анализа сведений, приведенных в таблице 1, следует, что индукционная сушка шпона с использованием БЭМП имеет преимущества по сравнению с другими сушильными агрегатами, т.к. при меньшей температуре сушильного агента и меньшей продолжительности времени сушки достигается заданная величина конечной влажности. К достоинствам рассматриваемой установки следует отнести и то, что она не требует для её обслуживания специально обученного персонала, т.к. работает от промышленной сети напряжением 0,4 кВ.

Кроме того экономия электрической энергии достигается за счет того, что индукционная установка с БЭМП не требует наличия для вращения сушильного барабана дополнительных электродвигателей, которые входят в состав оборудования воздушных (СУР-3, СУР-6 и др.) и газовых (СРГ-25М, СРГ-Г и др.) сушильных камер [2].

Таблица 1 – Средняя продолжительность сушки березового шпона, мин

Толщина шпона, мм	Средняя температура сушильного агента / стенки барабана индукционной установка с БЭМП, °С	Воздушная сушилка	Газовая сушилка	Индукционная установка с БЭМП
0,3	70/65	4,2	4,4	3,5
0,4	80/75	4,4	4,5	4,0
0,8	110/100	9,0	7,3	6,5
1,5	120/110	13,2	12,7	10
2,2	140/120	16,5	16,5	12
3,5	140/130	30	30	25
4,0	170/160	38	38	30

Таким образом, разработка и внедрение энергоэффективных сушильных комплексов является задачей актуальной и своевременной. Решение этой задачи направлено на экономию электроэнергии, снижение себестоимости сушки шпона, а следовательно и стоимости конечного продукта мебельного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расев, А.И. Сушка древесины. Учебное пособие для студентов вузов./ А.И. Расев. – Ozon.ru: Лань, 2010. – 416 с.
2. Чемоданова, А. Н. Сушка древесины. Справочные материалы./ А. Н. Чемоданова, Е. М. Царева, С.Е. Анисимов. – Изд.: Инфра – Инженерия, 2022. – 221 с.
3. Качанов, А.Н. Патент Республики Казахстан № 7227 «Сушилка для шпона и длинномерных волокнистых материалов»./Качанов А.Н., Чукумов М.Н., Королева Т.Г., Качанов Н.А., Иващенко В.В.// Национальное патентное ведомство Республики Казахстан, 15.02.1999, бюл.№2.
4. Качанов, А.Н. Классификация и область применения систем низкотемпературного индукционного нагрева с разомкнутыми магнитопроводами./Качанов А.Н., Коренков Д.А., Качанов Н.А. // Вестник Московского энергетического института. – 2016. - № 2. – С. 36-40.
5. Качанов, А.Н. Результаты исследования электромагнитных сил и мощности тепловыделения в индукционных системах с бегущим электромагнитным полем./ А.Н.Качанов А.Н., Миронов Е.А. – Вестник МЭИ. 2023, № 3. – С. 55-62.
6. Вольдек, А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом./ А.И Вольдек. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.
7. Веселовский, О.Н. Линейные синхронные двигатели./ О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
8. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали./ А.Б. Кувалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
9. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп./ А.М. Вайнберг. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.

**Качанов Александр Николаевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им.  
И.С. Тургенева»  
Академик АЭН РФ, доктор  
технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой электрооборудования  
и энергосбережения  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
тел.: +7 (4862) 41 98 53;  
E-mail: kan@ostu.ru

**Тимохин Вячеслав Александрович**  
АО «Орелоблэнерго», г. Орел  
Доктор электротехники,  
Заслуженный энергетик России,  
главный инженер  
302030, г. Орел, Пл. Поликарпова, 8  
e-mail: timohin@oreoblenergo.ru

**Качанов Николай Александрович**  
АО «Орелоблэнерго», г. Орел  
Заместитель начальника службы  
АСУ  
302030, г. Орел, Пл. Поликарпова, 8  
e-mail: nk3575@mail.ru

KACHANOV A.N., TIMOKHIN V.A., KACHANOV N.A.

## ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF AN INDUCTION VENEER DRYING UNIT

**Abstract** The article considers an induction veneer drying unit with a running electromagnetic field and presents the results of theoretical and experimental studies of its operation in comparison with other drying units that use air and gas as a heating agent. The advantages of using a running electromagnetic field to obtain uniform heating of a ferromagnetic drum are shown and the factors affecting its rotation speed are identified. When assessing the energy efficiency of an induction unit, its advantages are shown in comparison with other drying units that also provide drying of sliced veneer with a thickness of 0.3 to 4 mm in a range of operating temperatures from 80 to 190 degrees Celsius. The optimal thickness of the wall of a ferromagnetic cylindrical drum is substantiated, ensuring uniform heating and, as a consequence, the quality of the dried veneer.

**Key words:** induction unit, running electromagnetic field, veneer drying, humidity, warping, corrugation, industrial frequency network, Poynting vector, energy efficiency.

## BIBLIOGRAPHY

1. Rasev, A.I. Wood drying. A textbook for university students. / A.I. Rasev. - Ozon.ru: Lan, 2010. - 416 p.
2. Chemodanova, A.N. Wood drying. Reference materials. / A.N. Chemodanova, E.M. Tsareva, S.E. Anisimov. - Publ.: Infra - Engineering, 2022. - 221 p.
3. Kachanov, A.N. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 7227 "Dryer for veneer and long fibrous materials". / Kachanov A.N., Chukumov M.N., Koroleva T.G., Kachanov N.A., Ivaschenko V.V. // National Patent Office of the Republic of Kazakhstan, 15.02.1999, Bulletin No. 2.
4. Kachanov, A.N. Classification and scope of application of low-temperature induction heating systems with open magnetic circuits. / Kachanov A.N., Korenkov D.A., Kachanov N.A. // Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. - 2016. - No. 2. - P. 36-40.
5. Kachanov, A.N. Results of the study of electromagnetic forces and heat generation power in induction systems with a running electromagnetic field. / A.N. Kachanov A.N., Mironov E.A. - Bulletin of MPEI. 2023, No. 3. - P. 55-62.
6. Voldek, A.I. Induction magnetohydrodynamic machines with a liquid-metal working fluid. / A.I. Voldek. - L.: Energy, 1970. - 272 p.
7. Veselovsky, O.N. Linear synchronous motors. / O.N. Veselovsky, A.Yu. Konyaev, F.N. Sarapulov - M.: Energoatomizdat, 1991. - 256 p.
8. Kuvaldin, A.B. Induction heating of ferromagnetic steel. / A.B. Kuvaldin. - M.: Energoatomizdat, 1988. - 200 p.
9. Weinberg, A.M. Induction melting furnaces. Textbook for universities. 2nd ed., revised and enlarged / A.M. Weinberg. - M.: Energy, 1967. - 416 p.

**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 Saving  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
ph.: +7 (4862) 41 98 53;  
E-mail: kan@ostu.ru

**Timokhin Vyacheslav Alexandrovich**  
JSC "Oreoblenergo", Orel  
Doctor of Electrical Engineering,  
Honored Power Engineer of Russia,  
Chief Engineer  
302030, Orel, Polikarpova pl., 8  
e-mail: timohin@oreoblenergo.ru

**Kachanov Nikolai Alexandrovich**  
JSC "Oreoblenergo", Orel  
Deputy Head of the ACS service  
302030, Orel, Polikarpova pl., 8  
e-mail: nk3575@mail.ru

МАКАРОВ А.Н., ПАВЛОВА Ю.М.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ В ПОТОКИ КОНВЕКТИВНЫЕ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ВАННЕ МЕТАЛЛА ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований теплообмена в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), которые показали, что тепловые потоки, падающие от дуг на поверхности нагрева, на 85-95% состоят из потоков теплового излучения. Изложены законы теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов, по которым осуществляется расчет теплообмена в ДСП. Экспериментальные и расчетные данные по тепловым потокам излучения дуг на поверхности нагрева отличаются не более чем на 5-8%, что говорит о соответствии законов теплового излучения газовых объемов реальным процессам теплообмена в ДСП. Рассчитали теплообмен дуг в ванне ДСП. При полном заглублении дуг в углубления в ванне, шлаке тепловые потоки излучения дуг преобразуются в углублениях в конвективные тепловые потоки и потоки теплопроводности, нагревающие весь объем ванны металла и шлак.

**Ключевые слова:** Электрическая дуга, сталь, печь, теплообмен, тепловое излучение, ванна металла, конвективный теплообмен.

### Введение

Исследования электрических балансов мощных дуговых сталеплавильных печей (ДСП) показали, что электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии, поступающей в ДСП [1]. На долю дуг приходится 55-65% тепловой энергии, поступающей в печь, поступление тепла от других источников распределяется следующим образом: газокислородные горелки (ГКГ) 7-14%, инжекторы угольного порошка 12-18%, энергия реакций окисления Fe, Mn, Si 12-20%. Вся электрическая энергия, проведенная к электрическим дугам, преобразуется в них в тепловой поток. Многолетние, многочисленные исследования теплообмена в дуговых сталеплавильных печах различной мощности и вместимости, выполненные на различных металлургических заводах научными группами ВНИИЭТО в 1970-80-е годы показали [2], что теплообмен дуг с поверхностями нагрева в печах осуществляется тепловым излучением. Регистрация тепловых потоков тепломерами с разделением лучистой и конвективной составляющих потоков, падающих на поверхности стен, свода, ванны металла, показала, что тепловые потоки, падающие от дуг на поверхности нагрева, на 85-95% состоят из потоков тепловых излучений [2]. Проведенными ВНИИЭТО исследованиями установлено, что при увеличении мощности дуг пропорционально возрастает плотность тепловых потоков излучения дуг на поверхности стен свода, ванны металла.

Более поздние исследования показали, что в высокомошных 100-тонных ДСП 90-94% мощности дуги выделяется в столбе дуги, 2-3% из этой мощности передается ионизированным газом (плазмой столба дуги) конвекцией ванне металла, остальная (основная) мощность излучается столбом дуги (ионизированным газом) на поверхности ванны металла, стен, свода. Часть мощности дуги, 6-10% мощности дуги, выделяется в анодно-катодных пятнах на электроде и ванне металла и передается теплопроводимостью приблизительно в равных долях графитовому электроду и ванне металла [3-6]. Столб дуги представляет собой, как было сказано выше, плазму, то есть высокотемпературный ионизированный газовый объем, излучающий интенсивный тепловой поток по всем направлениям рабочего пространства ДСП.

### Основная часть

Результаты экспериментальных исследований теплообмена в дуговых сталеплавильных печах коллектива ВНИИЭТО были подтверждены в 1980-90-е годы расчетами и экспериментальными исследованиями теплообмена на действующих высокомошных дуговых сталеплавильных печах. Расчеты плотностей потоков тепловых излучений дуг на расчетные площадки стен ДСП осуществляли по выведенному аналитическим путем в России в ТвГТУ первому закону теплового излучения ионизированных и не ионизированных газовых объемов [3]:

$$q = \frac{\varphi_{ДФ} P_D}{F e^{kr}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{ДФ}$  – локальный угловой коэффициент теплового излучения дуги (доля излучения дуги) на расчетную площадку;

$P_D$  – мощность дуги;

$F$  – площадь расчетной площадки;

$k$  – коэффициент поглощения газовой среды электропечи;

$r$  – средняя длина пути лучей от излучающих атомов столба дуги до расчетной площадки.

Для окончания периода расплавления шихты в высокоомощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-100 по формуле (1) произведен расчет потоков тепловых излучений дуг, падающих на водоохлаждаемые панели по периметру стен. Расчет осуществлялся для расчетных площадок, расположенных на высоте 1 м от уровня порога посередине водоохлаждаемых панелей [3]. Результаты расчетов показали следующее: плотность потоков тепловых излучений дуг на расчетные площадки стен тем больше, чем больше мощность дуг; при одинаковой мощности дуг с увеличением коэффициента поглощения внутрипечной атмосферы во время продувки ванны кислородом плотность потоков тепловых излучений дуг на стены уменьшается. Расчетом получено: при увеличении мощности дуг на 10% плотность потоков тепловых излучений от дуг на расчетные площадки увеличивается на 10-11%.

Расчетные данные сравнили с экспериментальными данными изменения температуры воды на входе и выходе из стеновых панелей, по которой определяли среднюю плотность тепловых потоков, падающих на водоохлаждаемые панели стен. Экспериментальные данные измерения тепловых потоков, падающих на водоохлаждаемые панели стен, аналогичны расчетным данным: при увеличении мощности дуг на 10% пропорционально на 10-11% увеличивается плотность тепловых потоков излучения, падающих от дуг на водоохлаждаемые панели стен. Результаты расчетов по формуле (1) плотностей потоков тепловых излучений дуг, падающих на расчетные площадки на стеновых панелях, отличаются не более чем на 5-8% от результатов экспериментальных измерений плотностей тепловых потоков, падающих на панели [3]. Так как результаты расчетов отличаются не более чем на 5-8% от экспериментальных данных, то можно говорить об адекватности математической модели теплообмена дуг (1) реальным процессам теплообмена дуг в рабочем пространстве дуговых сталеплавильных печей.

При проведении экспериментальных исследований получили подтверждение расчетных данных о снижении тепловых потоков излучения дуг, падающих на панели стен, при увеличении запыленности атмосферы и пропорциональным увеличением коэффициента поглощения (см. формулу 1) в процессе продувки ванны кислородом: при неработающих кислородных фурмах и лучепрозрачной атмосфере в печи тепловые потоки излучения дуг на водоохлаждаемые панели стен в 2-3 раза больше по сравнению с этапом плавки с работающими фурмами, создающими запыленную атмосферу в печи, поглощающую значительную часть потоков теплового излучения дуг.

Аналогичное совпадение расчетных данных по формуле (1) и экспериментальных данных на действующих ДСП установили по влиянию угловых коэффициентов излучения дуг на плотность тепловых потоков излучения дуг на расчетные площадки [3,4]. Расчетами установили: чем ближе дуги расположены к стенам, тем больше угловой коэффициент излучения дуг на стены, тем больше поток теплового излучения дуг на стены, тем меньше угловой коэффициент излучения и поток теплового излучения дуг на ванну металла, тем меньше КПД дуг [3]. Аналогичные результаты получили экспериментальным путем: в малотоннажных печах ДСП-0,5-ДСП-6, вместимостью 0,5-6 т металла, дуги близко расположены к стенам, расстояние от дуг до стен  $r_{cm}=0,31-0,59$  м, при горении дуг на открытую ванну металла угловой коэффициент излучения дуг на стены и свод  $\varphi_{dc}=0,80-0,85$ , на ванну металла  $\varphi_{dm}=0,20-0,15$ , КПД дуг мал  $\eta_d=0,30-0,35$ , удельный расход электроэнергии на расплавление шихты велик и составляет  $G_3=475-650$  кВт·ч/т.

В большегрузных печах, вместимостью 100-120т ДСП-100, ДСП-120, дуги расположены далеко от стен, расстояние от дуг до стен  $r_{cm}=2,0-2,53$  м, при горении дуг на открытую ванну металла угловой коэффициент излучения дуг на стены и свод  $\varphi_{dc}=0,5-0,6$ , на ванну металла  $\varphi_{dm}=0,5-0,4$ , КПД дуг  $\eta_d=0,5-0,6$ , удельный расход электроэнергии на расплавление шихты небольшой и составляет  $G_3=375-385$  кВт·ч/т. Таким образом, практика эксплуатации дуговых сталеплавильных печей подтверждает соответствие закона теплового излучения газовых объемов (1) электрических дуг реальным процессом теплообмена дуг, происходящим в дуговых сталеплавильных печах.

Фотографирование и киносъемка дуги в ДСП показали [2,5,6,7], что дуга представляет геометрическое тело в виде усеченного конуса, расположенного между графитовым электродом и ванной металла. Так как градиент напряжения и мощности равномерно распределен в столбе дуги то столб в расчетах моделируется излучающим цилиндрическим газовым объемом [2-7].

С открытием в России законов теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов проблема расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных металлургических печах, топках, камерах сгорания решена [3, 4]. Согласно открытым законам теплового излучения коэффициенты теплового излучения, плотности потоков тепловых излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны, а плотность потока теплового излучения цилиндрических газовых объемов большого диаметра и его цилиндрической оси симметрии на расчетную площадку равны при равенстве выделяющихся в них тепловых мощностей.

Первый закон: «Плотность потока теплового излучения, падающего от газового объема любой формы и величины на расчетную площадку, прямо пропорциональна его мощности, угловому коэффициенту излучения и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения, средней длине пути лучей от атомов объема до площадки и площади площадки»:

$$q_{FdF} = \frac{\phi_{F_0dF} \cdot P_F \cdot e^{-kl}}{F_0} = \frac{\phi_{F_0dF} \cdot P_F}{F_0 \cdot e^{kl}} \quad (2)$$

Второй закон «Средняя длина пути лучей от квадриллионов излучающих атомов коаксиальных цилиндрических (или концентричных сферических) газовых объемов до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии (или от центра сфер) до расчетной площадки»:

$$l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_i = \left( \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \right) = l \quad (3)$$

Третий закон «Угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических (или концентричных сферических) газовых объемов на расчетную площадку равны»:

$$\phi_{F_1dF} = \phi_{F_2dF} = \phi_{F_3dF} = \dots = \phi_{F_idF} \quad (4)$$

Четвертый закон «Плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических (или концентричных сферических) газовых объемов на расчетную площадку равны»:

$$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF} = \dots = q_{F_idF} \quad (5)$$

Пятый закон «Плотности потоков тепловых излучений цилиндрического (или сферического) газового объема большого диаметра и его цилиндрической оси симметрии (или центра сферы малого диаметра) на расчетную площадку равны при равенстве выделяющихся в них тепловых мощностей»:

$$q_{F_idF} = \sum_{i=1}^n q_{F_idF} \quad (6)$$

В газовые объемы электрических дуг ДСП, факелов печей, топок, камер сгорания вписываются цилиндрические газовые объемы, а в расчетах тепловое излучение цилиндрических газовых объемов, согласно открытым законам, адекватно моделируется тепловым излучением их осей симметрии. Открытые законы позволили перейти при расчетах угловых коэффициентов излучения газовых объемов, средней длине пути лучей от

излучающих атомов объемов до расчетной площадки от тройных нерешенных в настоящее время интегралов по ширине, глубине, высоте газовых объемов к однократным решенным автором [3] интегралом по высоте цилиндрической оси симметрии газовых объемов. Средняя длина пути лучей от излучающих атомов газовых объемов (например, электрической дуги) до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии до площадки. В работе [3] решены однократные интегралы и получены аналитические выражения для расчета угловых коэффициентов излучения цилиндрических газовых объемов при любом пространственном положении их цилиндрических осей симметрии и расчетных площадок.

Открытые законы теплового излучения цилиндрических и сферических газовых объемов позволяют рассчитать с высокой точностью теплообмен с поверхностями нагрева газовых объемов любой формы и величины, вписывая в них цилиндрические и сферические газовые объемы. Атомы представляют собой сферические объемы, вписывая которые в газовые объемы и используя компьютер можно рассчитать теплообмен излучением газовых объемов любой формы и величины с высокой точностью. Открытые законы обладают мультидисциплинарностью и используются для расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных металлургических печах, топках паровых котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок в металлургии, энергетике, различных отраслях промышленности.

Результаты расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках, камерах сгорания ГТУ, выполненные по законам теплового излучения газовых объемов, подтверждены многочисленными многолетними экспериментальными исследованиями на действующих дуговых сталеплавильных и факельных металлургических печах, топках паровых котлов, камерах сгорания ГТУ [3,4,8,12].

В [3] изложена методика и результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг на ванну металла и теплообмен дуг в шаровом сегменте в ванне металла. При полном погружении дуг в жидкий металл и шлак 78-80% потока теплового излучения дуг преобразуется в шаровых сегментах в ванне металла в интенсивные конвективные тепловые потоки в жидкометаллической ванне и шлаке при турбулентном перемещении жидкого металла и шлака дугами и КПД дуг достигает максимального значения 78-80%. Процесс преобразования мощных потоков теплового излучения дуг в аналогичной мощности конвективные тепловые потоки в ванне металла и шлаке при турбулентном перемешивании жидкого металла и шлака дугами и в поток теплопроводности в объеме ванны в настоящее время имеет качественное описание, малоизучен и требует дополнительных аналитических и экспериментальных исследований. В связи с высокими температурами электрических дуг, жидкого металла, шлака экспериментальные исследования в шаровых сегментах под дугами в ванне металла в настоящее время невозможны, единственным путем познания процессов преобразования лучистой энергии дуг в конвективный тепловой поток при турбулентном перемещении жидкого металла, шлака и в поток теплопроводности в объеме ванны является путь аналитических исследований. Выполним дополнительные расчеты и аналитические исследования теплообмена дуг в ванне металла для объяснения данного физического явления преобразования теплового потока излучения дуг в конвективный тепловой поток и в поток теплопроводности в ванне металла и шлаке.

Рассмотрим теплообмен в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах ДСП-100, мощностью электропечного трансформатора 80-90 МВА. Расчет теплообмена в ДСП-100 осуществили при работе печи на максимальной мощности при частичном и полном закрытии дуг шлаком, а также при прозрачной и запыленной атмосфере в печи. Как показали результаты экспериментальных исследований [13] и расчетов [3] коэффициент поглощения газовой среды современной ДСП находится в диапазоне  $k=0-0,5$ . Первый показатель  $k=0$  соответствует лучепрозрачной атмосфере печи, существующей при отключенных газокислородных горелках, кислородных фурмах, манипуляторах угольного порошка, второй показатель  $k=0,5$  соответствует запыленной атмосфере печи, образующейся в процессе работы ГКГ, фурм,

манипуляторов. Параметры печи ДСП-100 и электропечного трансформатора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры печи ДСП-100 и электропечного трансформатора

$D_в$ , м	$d_p$ , м	$H_{ст}$ , м	$d_э$ , мм	$S$ , МВА	$U_{2л}$ , В	$U_{2ф}$ , В	$I_d$ , кА
5,4	1,4	2,5	600	80-90	829-300	479-173	60-65

В таблице 1 использованы следующие обозначения:  $d_э, D_в, d_p$  – соответственно, диаметр электродов, ванны, распада электродов;  $h_{ст}$  – высота стен;  $S$  – мощность электропечного трансформатора;  $U_{2л}, U_{2ф}$  – диапазон изменения, соответственно, линейного и фазного напряжения электропечного трансформатора;  $I_d$  – диапазон изменения тока дуги.

Для печи ДСП-100 с параметрами, изложенными в таблице 1, работающей на основной рабочей ступени трансформатора, используемой при расплавлении колодцев и в жидкий период плавки, рассчитали параметры электрических дуг печи. Методика расчета параметров дуг печи изложена в [3]. Результаты расчета параметров дуг ДСП-100 приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры рабочей ступени трансформатора и электрических дуг печи ДСП-100

$U_{2л}$ , В	$U_{2ф}$ , В	$U_d$ , В	$I_d$ , кА	$P_d$ , МВт	$l_d$ , мм	$h_3$ , мм	$k$	$\alpha_{ст}$
725	419	316	62	19,6	370	100;240; 370	0; 0,35; 0,70	0,92

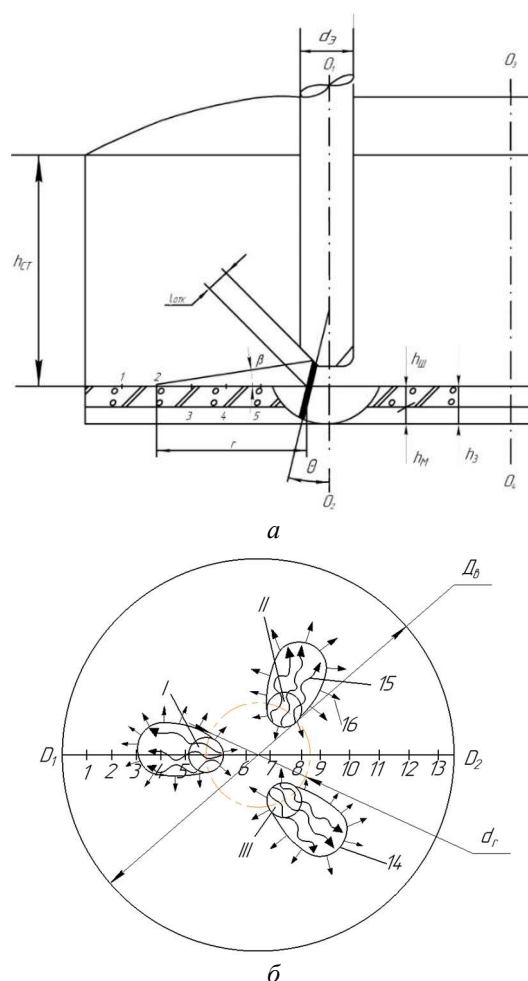


Рисунок 1 – Схема для расчета потоков теплового излучения дуг по поверхности ванны металла (а), взаиморасположения электродов, ванны металла, стен (б), масштаб уменьшен

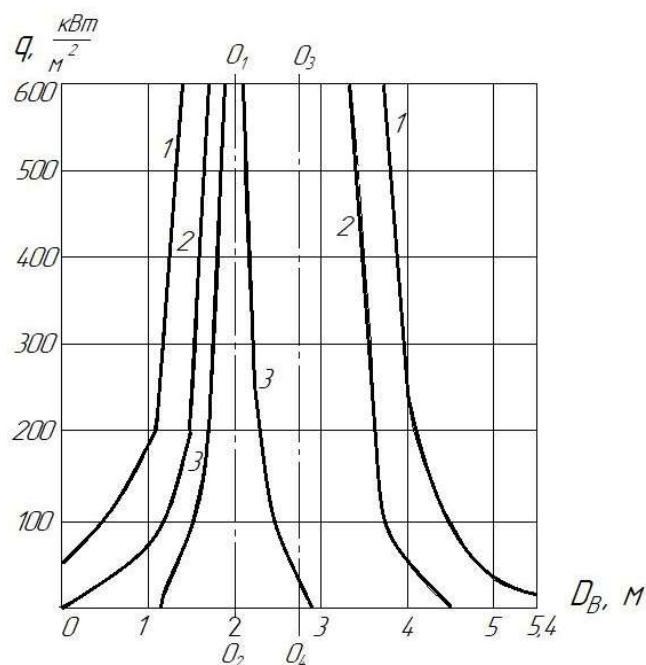
В таблице 3 использованы следующие условные обозначения:  $U_d, P_d, l_d$  – соответственно, напряжение на дуге, мощность и длина дуги;  $h_3$  – высота заглубления дуги в

жидкометаллическую ванну и шлак;  $\alpha_{\text{ст}}$  – доля мощности, выделяющаяся в столбе дуги. На рисунке 1,а приведена схема для расчета тепловых потоков излучения дуг по поверхности ванны металла и шарового сегмента в ванне, на рисунке 1,б поверхность ванны металла, расчетные площадки 1-13 на поверхности ванны. На рисунке 1 использованы следующие обозначения:  $O_1O_2$  – ось электрода;  $O_3O_4$  – вертикальная ось печи;  $h_{\text{ш}}h_{\text{м}}$  – высота заглубления дуг, соответственно, в шлак и жидкометаллическую ванну;  $\theta$  – угол отклонения дуги от оси электрода;  $r$  – расстояние от оси дуги до расчетной площадки;  $l_{\text{отк}}$  – открытая часть дуги, которая излучает на расчетную площадку 2;  $\beta$  – угол, под которым открытая часть дуги излучает на площадку 2; 14 – горячая зона под дугами, образующаяся на поверхности ванны металла в результате электромагнитного выдувания дуг; 15 – конвективный теплообмен в горячей зоне; 16 – теплообмен теплопроводностью из горячей зоны в объем ванны; I, II, III – номера электродов и дуг;  $D_1D_2$  – ось симметрии ванны.

Согласно законам теплового излучения газовых объемов электрическая дуга, цилиндрический ионизированный газовый объем, моделируется в расчетах цилиндрической осью симметрии объема (рисунок 1, а). Расчет плотностей потоков тепловых излучений дуг на расчетные площадки 1-13, расположенные на поверхности ванны металла по оси симметрии  $D_1D_2$ , осуществляли по аналитическому выражению [7]:

$$q = \frac{\varphi_{\text{ДФ}} P_{\text{Д}}}{F e^{kr}} = \frac{\alpha_{\text{ст}} P_{\text{Д}} l_{\text{отк}} \sin^2 \beta}{2\pi^2 r l_{\text{Д}}^2 e^{kr}} \quad (7)$$

Для каждой расчетной площадки 1-13 определили плотности потоков тепловых излучений, падающих от дуг I, II, III на ванну металла, результаты расчетов суммировали. Расчеты осуществляли в программах «КОМПАС» и «MSEXCEL», результаты расчетов изображены на рисунке 2, где графики 1-3 характеризуют распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг, высотой 370 мм, по поверхности ванны металла и шарового сегмента в поглощающей атмосфере печи с коэффициентом поглощения  $k = 0,35$  мм при высоте заглубления дуг в шлак и ванну металла 100 мм (1), 240 мм (2), 370 мм (3).



**Рисунок 2 – Распределение плотностей потоков теплового излучения дуг по поверхности ванны металла в поглощающей атмосфере печи,  $k=0,35$ ,  $l_{\text{д}}=370$  мм, при высоте заглубления дуг в шлак и металл  $h_{\text{ш}}=100$  мм (1),  $h_{\text{ш}}=240$  мм (2),  $h_{\text{ш}}=370$  мм (3)**

Для сравнения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны металла на расчетные площадки, расположенные напротив дуг и между дугами, результаты расчетов свели в таблицу 3.

Таблица 3 – Плотности потоков тепловых излучений дуг на расчетные площадки 3-5, 11, расположенные, соответственно, напротив дуг, между дугами и на площадку, расположенную в шаровом сегменте

№ площадок	3			4			5			11		
$h_3$ , мм	100	240	370	100	240	370	100	240	370	100	240	370
$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	190	72	0	750	360	110	$12,5 \cdot 10^3$	$12,5 \cdot 10^3$	$12,5 \cdot 10^3$	132	22	0

Как видно из рисунка 2 и таблицы 3 чем больше высота слоя шлака и заглубление дуг в жидкий металл и шлак, тем меньше плотности потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны металла. Плотность потоков тепловых излучений дуг на ванну металла на расчетную площадку 3, расположенную напротив дуг на расстоянии 1 м от стен, изменятся в зависимости от увеличения высоты слоя шлака следующим образом: при заглублении дуг  $h_3=100$  мм;  $q=190$  кВт/м<sup>2</sup>; при  $h_3=240$  мм  $q=72$  кВт/м<sup>2</sup>, то есть снижается в 2,64 раза; при полном заглублении дуг  $h_3=370$  мм плотность потоков теплового излучения дуг снижается до нуля. При полном заглублении дуг в шаровые сегменты в ванне (рисунок 1,а) тепловые потоки излучения дуг преобразуются в углублениях в интенсивные конвективные тепловые потоки и потоки теплопроводности, нагревающие весь объем ванны металла и шлака (рисунок 1,б). Плотность потоков теплового излучения дуг на ванну металла на расчетную площадку 11, расположенную между дугами, в 1,5-3,3 раза меньше аналогичного показателя на расчетную площадку 3, расположенную напротив дуг. Плотность потоков теплового излучения дуг на площадку 1, расположенную напротив дуг около откосов, в 60 раз превышает плотность потоков теплового излучения дуг на площадку 13, расположенную около откосов между дугами.

Вследствие меньших плотностей потоков теплового излучения дуг в 3,3-60 раз на ванну металла на периферии между дугами по сравнению с плотностями потоков тепловых излучений дуг на ванну металла напротив дуг и отсутствия мощных конвективных тепловых потоков на расчетных площадках [9-13] расплавление шихты на откосах между дугами идет медленнее и в конце периода расплавления на откосах между дугами могут находиться куски нерасплавившейся шихты. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями: в периферийных зонах на откосах между дугами к окончанию расплавления под слоем шлака обнаруживали остатки лома [14,15]. Для равномерного расплавления шихты по периметру ванны и выравнивания температуры металла в стенах между дугами устанавливают газокислородные горелки, рафинировочные кислородные горелки, инжекторы для вдувания углеродосодержащего порошка.

Плотность потоков теплового излучения дуг на поверхность ванны металла возрастает с приближением к осям электродов и дуг и на площадку 4 составляет:  $q=750$  кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3=100$  мм,  $q=360$  кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3=240$  мм,  $q=110$  кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3=370$  мм. При полном погружении дуг в ванну металла и шлак подавляющая часть теплового излучения дуг сосредоточена в шаровом сегменте в ванне металла и шлаке и плотность теплового излучения дуг в сегменте на расстоянии 0,3 м от оси дуг не зависит от заглубления дуг и составляет  $12,5$  МВт/м<sup>2</sup>, а под осью дуги превышает  $30$  МВт/м<sup>2</sup>. При полном погружении дуг в ванну металла и шлак происходит перераспределение теплового излучения дуг между поверхностями ванны металла, стен, свода и поверхностями шаровых сегментов в ванне металла и шлаке (см. рисунок 1,а). С увеличением высоты слоя шлака тепловое излучение дуг на поверхности стен, свода и ванны металла уменьшаются, а на поверхности шаровых сегментов в ванне металла и шлаке увеличивается. Следовательно, поток теплового излучения дуг при полном погружении дуг в шлак и ванну металла в шаровых сегментах преобразуется в них и близлежащих к ним областях в полезный тепловой поток в ванне металла и шлаке. Данная гипотеза подтверждена практикой эксплуатации ДСП: при соотношении высоты заглубления к длине дуг  $h_3/l_d=0,8$  КПД дуг  $\eta_d=0,65$ , а удельный расход электроэнергии составляет  $G_3=420$  кВт·ч/т; при полном погружении дуг в ванну металла и шлак  $h_3/l_d=1$ ,  $\eta_d=0,78$ ,  $G_3=380$  кВт·ч/т [3, 15]. Для того, чтобы понять процесс преобразования потока теплового излучения дуг в конвективный

тепловой поток в ванне металла и шлаке в шаровом сегменте необходимо рассмотреть теплофизические, электромагнитные явления, происходящие в электрических дугах, шаровых сегментах и примыкающих к ним слоях жидкого металла и шлака.

### **Заключение**

Электрические дуги являются основными источниками тепловой энергии в ДСП, на их долю приходится 55-65% тепловой энергии, поступающей в печь. Многолетние экспериментальные исследования теплообмена показали, что электрические дуги излучают 85-95% тепловой мощности, выделяющейся в них. Основным источником теплового излучения в дуге ДСП является столб дуги, в котором выделяется 90-95% мощности дуги. Для расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг на поверхности нагрева предложено использовать законы теплового излучения газовых объемов. Экспериментальные данные измерения тепловых потоков, падающих на водоохлаждаемые панели стен от дуг, аналогичны данным тепловых потоков излучения дуг на стены, полученным расчетом по первому закону теплового излучения газовых объемов. Рассчитали теплообмен дуг в ванне металла высокоомощной печи ДСП-100. Плотности потоков тепловых излучений дуг на периферийные зоны, находящихся между дугами, в 3-60 раз меньше плотностей потоков тепловых излучений дуг на периферийные зоны напротив дуг. При полном заглублении дуг в ванну металла, шлак тепловые потоки излучения дуг преобразуются в углубления в потоки конвективные и теплопроводности, нагревающие весь объем ванны металла и шлак.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Евстратов В.Г., Киселев А.Д., Зинуров И.Ю. и др. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе // *Электрометаллургия*. 2012. №8. С. 2-6.
2. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
3. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.
4. Дорофеев Г.А., Зинягин Т.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: изд-во ТНТ, 2021. 324 с.
5. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
6. Окорочков Н.А. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
7. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1971. 304 с.
8. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
9. Расчет нагревательных и термических печей: справочник / под ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовеского. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
10. Зигель Р., Хауэлл Д. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
11. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
12. Кузнецов М.С., Якушев Е.В., Кулагин С.А. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи // *Электрометаллургия*. 2010. №2. С. 2-6.
13. Волос Д.Л. Исследование теплообмена в свободном пространстве дуговой сталеплавильной печи и разработка методики расчета ее водоохлаждаемых элементов: дисс. канд. техн. наук. Череповец: ЧГУ, 2005. 165 с.
14. Меркер Э.Э., Черменов Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. Старый Оскол: изд-во ТНТ, 2019. 320 с.
15. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // *Вестник ЮУрГТ. Серия «Металлургия»*. 2015. №3. С. 70-79.

---

#### **Макаров Анатолий Николаевич**

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники  
170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.  
Тел. (4822) 78-83-17  
tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

#### **Павлова Юлия Михайловна**

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники  
170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22.  
Тел. (4822) 78-83-17  
sokolhawk98@gmail.com

MAKAROV A.N., PAVLOVA Y.M.

## CONVERSION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF ARCS INTO CONVECTIVE AND HEAT TRANSFER FLUXES IN A METAL BATH OF ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES

**Abstract.** *The results of experimental studies of heat transfer in arc steelmaking furnaces (chipboard) are presented, which showed that the heat fluxes falling from arcs on the heating surface consist of 85-95% of thermal radiation fluxes. The laws of thermal radiation of ionized and non-ionized gas volumes are described, according to which heat transfer in chipboard is calculated. Experimental and calculated data on the thermal fluxes of arc radiation on the heating surface differ by no more than 5-8%, which indicates that the laws of thermal radiation of gas volumes correspond to real heat transfer processes in chipboard. The heat exchange of the arcs in the chipboard bath was calculated. When the arcs are completely buried in the recesses in the bath, the slag, the thermal radiation fluxes of the arcs are converted in the recesses into convective heat fluxes and thermal conductivity fluxes, heating the entire volume of the metal bath and slag.*

**Keywords:** *Electric arc, steel, furnace, heat transfer, thermal radiation, metal bath, convective heat transfer.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Evstratov V.G., Kiselev A.D., Zinurov I.Yu., etc. Features of thermal operation of the electric furnace DSP-120 Consteel at the Ashinsky Metallurgical Plant // *Electrometallurgy*. 2012. No.8. pp. 2-6.
2. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. Thermal operation of arc steelmaking furnaces. M.: Metallurgy, 1981. 344 p.
3. Makarov A.N. Heat transfer in electric arc steelmaking and flare heating furnaces, furnaces of steam boilers, combustion chambers of gas turbine installations. Moscow-Vologda: Infra-Engineering, 2022. 452 p.
4. Dorofeev G.A., Zinyagin T.A., Makarov A.N. Production of steel based on direct reduction iron. Stary Oskol: TNT Publishing House, 2021. 324 p.
5. Egorov A.V. Electric melting furnaces of ferrous metallurgy. M.: Metallurgy, 1985. 280 p.
6. Okorokov N.A. Arc steelmaking furnaces. M.: Metallurgy, 1971. 347 p.
7. Sisoyan G.A. Electric arc in an electric furnace. M.: Metallurgy, 1971. 304 p.
8. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Heat exchange by radiation: handbook. M.: Energoatomizdat, 1991. 432 p.
9. Calculation of heating and thermal furnaces: handbook / edited by V.M. Tymchak and V.L. Gusovesky. M.: Metallurgy, 1983. 480 p.
10. Siegel R., Howell D. Heat transfer by radiation. M.: Mir, 1975. 934 p.
11. Sperrow E.M., Sess R.D. Heat transfer by radiation. L.: Energiya, 1971. 294 p.
12. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A. Influence of metal charge mass and slag thickness on steel smelting technology in an arc furnace // *Electrometallurgy*. 2010. No. 2. pp. 2-6.
13. Volos D.L. Investigation of heat transfer in the free space of an arc steelmaking furnace and the development of a method for calculating its water-cooled elements: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Cherepovets: CHSU, 2005. 165 p.
14. Merker E.E., Chermenov E.A. Electric melting of metallized pellets in an arc furnace. Stary Oskol: TNT Publishing House, 2019. 320 p.
15. Shishimirov M.V., Sosonkin O.M. Resource conservation and reserves for improving the efficiency of steel smelting in chipboard // *Bulletin of the JURGT. The Metallurgy series*. 2015. No. 3. pp. 70-79.

#### Makarov Anatoly Nikolaevich

Tver State Technical University, Tver  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the  
Department of Power Supply and Electrical Engineering  
170026, Tver, nab. Afanasia Nikitina, 22.  
Tel. (4822) 78-83-17  
tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

#### Pavlova Julia Mikhailovna

Tver State Technical University, Tver  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of  
the Department of Power Supply and Electrical  
Engineering  
170026, Tver, nab. Afanasia Nikitina, 22.  
Tel. (4822) 78-83-17  
sokolhawk98@gmail.com

© Макаров А.Н., Павлова Ю.М., 2025

ПТИЦЫНА Е.В., ПТИЦЫН Д.В., КУВАЛДИН А.Б.

## СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ПИТАНИИ ТОКОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И ТОКОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

**Аннотация.** В работе исследован энергетический баланс в излучательных электротехнологических установках с разными типами излучателей для питания переменным током 50 Гц и питания ТСФ. Показано, что применение тока сложной формы для питания излучателей позволяет снизить потери мощности в ИП: в трансформаторе, за счет работы на более низкой ступени РПН по сравнению с питанием синусоидальным током промышленной частоты; в ДН – при регулировании тока подмагничивания. Подтверждено снижение потерь мощности в светлых излучателях при одновременном воздействии температурной и электромагнитной составляющих.

**Ключевые слова:** излучательная электротехнологическая установка, светлые излучатели, трансформатор, дроссель насыщения, ток сложной формы, энергетический баланс.

### Введение

На значения показателей энергоэффективности излучательных электротехнологических установок (ИЭТУ) можно влиять путем повышения КПД [1-2], и за счет снижения удельного расхода электроэнергии, как например, в газоразрядных ЭТУ [3]. Следует напомнить, что в энергетическом балансе ИЭТУ параметрами энергоэффективности являются КПД излучателей, а также КПД и коэффициент мощности установки, которые характеризуют потери мощности в инфракрасных излучателях, а также потери активной мощности в элементах оборудования источников питания (ИП): в силовом трансформаторе с устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН); в дросселях насыщения (ДН). Последние обычно используются в ИП ЭТУ для плавного регулирования напряжения в пределах ступени РПН (в газоразрядных электротехнологических ЭТУ может использоваться до 80 ступеней). Основными элементами конструкции трансформаторов и ДН являются сердечник из магнитных материалов и обмотки [1-3]. В [3, 4] показано, что в электролизных, газоразрядных и других электротехнологических установках для получения позитивных технологических и энергетических эффектов используются разные пути совершенствования: автоматизация, механизация, применение новых конструкций установок и используемых материалов, совершенствование электрических режимов. Последнее можно реализовать за счет снижения токов утечек (потерь в элементах оборудования источников питания) [5, 6], или использования тока сложной формы. При этом род тока и полярность, применяемые в электротехнологических установках различные: переменный ток промышленной частоты; постоянный ток; выпрямленный ток с регулированием переменной составляющей; импульсный ток (униполярные импульсы с разной длительностью и скважностью и др.), переменный ток средних, высоких и сверх высоких частот и зависят от технологического процесса и особенностей исполнения ИП [4].

В [7] предложена методика экспериментальных исследований потерь активной мощности в излучателях разных типов ИЭТУ, разработано оборудование экспериментального стенда для исследований энергетических характеристик излучателей, выбраны приборы.

Экспериментально установлено, что при потреблении излучателем одинаковой активной мощности, режим с питанием ТСФ обеспечивает большую мощность потока излучения  $P_{\text{изл}}$ , на облучаемой поверхности на 12 %. Это свидетельствует о повышении коэффициента полезного действия (КПД) излучателей в ИЭТУ [7].

В [4] исследована возможность снижения потерь в элементах оборудования ИП ЭТУ. Например, известны результаты исследований потерь активной мощности в обмотках мощных дросселей насыщения (ДН) типа ДН-6300/26 преобразовательных агрегатов типов ВАКВ (ВАКД) электролизных и газоразрядных ЭТУ. Модернизация ДН позволила снизить

сопротивление рабочей обмотки (падение напряжения в три раза при максимальном токе подмагничивания), расширить диапазон регулирования тока в обмотке подмагничивания, уменьшить потери активной мощности в рабочей обмотке. В [8] установлено изменение потерь в магнитопроводе ДН от используемых материалов и частоты.

В настоящей работе уделено внимание исследованию следующих важных моментов:

- определению и сравнению потерь энергии в излучательной электротехнологической установке в режимах при питании переменным током 50 Гц и током сложной формы при условии одинаковой активной мощности, потребляемой из сети;
- оценке плотности потока излучения, то есть его части, попадающей на облучаемую поверхность, что позволяет сравнивать разные режимы: режим с питанием переменным током 50 Гц, и током сложной формы. Исследования выполнены для тока сложной формы (ТСФ1, ТСФ2 и др.).

Исследование плотности потока излучения выполнено в функции расстояния между излучателем и облучаемой поверхностью: при их размещении на удалении 240 и 480 мм от горизонтальной поверхности на примере обогрева сельскохозяйственных объектов (по мере роста молодняка). Указанные выше расстояния обусловлены габаритными размерами боковых поверхностей стандартных коробок из гофрированного картона для структурирования площади обогрева. Выполнен расчет мощности потока излучения на горизонтальной облучаемой поверхности (или для вертикального расположения излучателей исследована мощность потока излучения на животноводческих фермах).

Для исследования потерь активной мощности в элементах ИЭТУ: в силовом трансформаторе, ДН, излучателе от электрических режимов необходимо было разработать методику исследований энергетических характеристик, разработать стенд, выбрать измерительные приборы.

Цель работы: повышение КПД излучательных электротехнологических установок с разными типами излучателей на основе исследования электрических режимов при питании переменным током 50 Гц и током сложной формы.

#### **Оборудование и методика исследования**

Исследования выполнялись на модельных устройствах. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования энергетических характеристик излучательной электротехнологической установки для режимов с питанием током 50 Гц и током сложной формы приведена на рисунке 1. Обозначения, принятые на рисунке 1: Тр - однофазный трансформатор типа ОСМ1 1,6 кВА; ДН - дроссель насыщения; Изл - пять светлых излучателей типа ИКЗ мощностью по 250 Вт; АК - анализатор качества электрической энергии ANALYST 2060; С - спектрометр AvaSpec-US.

Настоящая работа является продолжением ранее выполненных исследований в [7]. В представленной работе питание ИЭТУ реализовано от сети 220 В через однофазный трансформатор типа ОСМ1 мощностью 1,6 кВА 220/220 В с переключением ступеней напряжения и ДН с регулированием тока подмагничивания. Коэффициент загрузки трансформатора при этом составил 0,8. В работе выполнены исследования параметров ИЭТУ для режимов работы: 50 Гц и ТСФ с диапазоном регулирования значений тока подмагничивания от 0,1 до 0,4 А дросселя насыщения.

В схеме предусматривалось регулирование напряжения устройством РПН трансформатора и гармонического состава ТСФ путем изменения тока подмагничивания ДН. В качестве излучателя была выбрана инфракрасная зеркальная лампа ИКЗ мощностью 250 Вт, которая применяется для обогрева и освещения в животноводстве, птицеводстве и растениеводстве.

Для измерений значений мощности в различных точках схемы использовался анализатор качества электрической энергии ANALYST 2060. Плотность мощности потока излучения измерялась с помощью спектрометра AvaSpec-USL.

Напряжение на излучателях в исследуемых режимах было 220 В. В экспериментах поддерживали одинаковое значение активной мощности, потребляемой из сети.

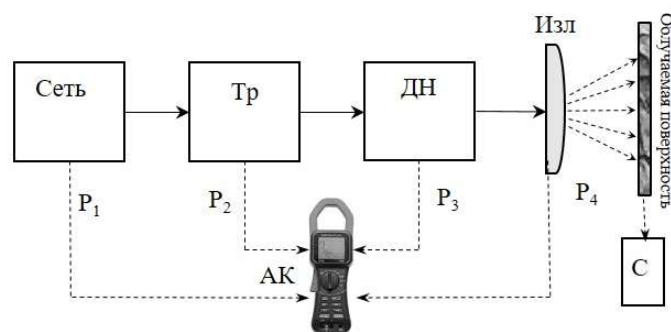


Рисунок 1 - Функциональная схема экспериментальной установки для исследования энергетических характеристик

Как показано в [7], измерение активной мощности, потребляемой из сети и мощности на выходе питающего трансформатора ( $P_1$  и  $P_2$ ) и мощность, на выходе дросселя насыщения ( $P_3$ ), мощность потока излучения на облучаемой поверхности ( $P_4$ ) и мощность потока излучения вне облучаемой поверхности ( $P_5$ ) в исследуемых режимах при ТСФ с разным подмагничиванием и токе 50 Гц. Затем определили составляющие потерь в ИЭТУ с последующим их сравнением для исследуемых электрических режимов по выражениям вида:

- потери в трансформаторе  $P_{тр} = P_1 - P_2$ ;
- потери в дросселе насыщения  $P_{дн} = P_2 - P_3$ ;
- потери мощности в излучателях  $P_{изл} = P_3 - P_4$ .

#### Экспериментальные исследования. Выбор ТСФ

Исследования потерь в трансформаторе, ДН, излучателе проводили для электрических режимов при питании ИЭТУ переменным током 50 Гц и током сложной формы с разными значениями тока подмагничивания. На рисунке 2 и рисунке 3 были представлены, соответственно, формы питающего напряжения при токе подмагничивания ДН 0,1 А ( $0,2 I_{п.маx}$ ) – ТСФ1 и 0,2 А ( $0,4 I_{п.маx}$ ) – ТСФ2, а также спектры и параметры исследуемых токов. Например, состав и амплитуды гармоник для ТСФ2 равны: 50 Гц – 100 %; 100 Гц – 0 %; 150 Гц – 35 %; 250 Гц – 85 %; 350 Гц – 15 %; 450 – 10 %; 550 – 5 %; 650 – 5 %; 750 – 5 %. На рисунке 4 и рисунке 5, соответственно, показаны формы питающего напряжения при токе подмагничивания ДН 0,3 А ( $0,6 I_{п.маx}$ ) – ТСФ3 и 0,4 А ( $0,8 I_{п.маx}$ ) – ТСФ4, а также их спектры.

Энергетические показатели ИЭТУ со светлыми излучателями (СИ) типа ИКЗ суммарной мощностью 1250 Вт в исследуемых режимах даны в таблице 1.

Для исследования плотности потока излучения в ИЭТУ со светлым излучателем в указанных выше режимах, использована методика, разработанная и изложенная в [7]. Радиометрический датчик спектрометра устанавливался также на расстоянии 240 мм и 480 мм от центра излучателя.

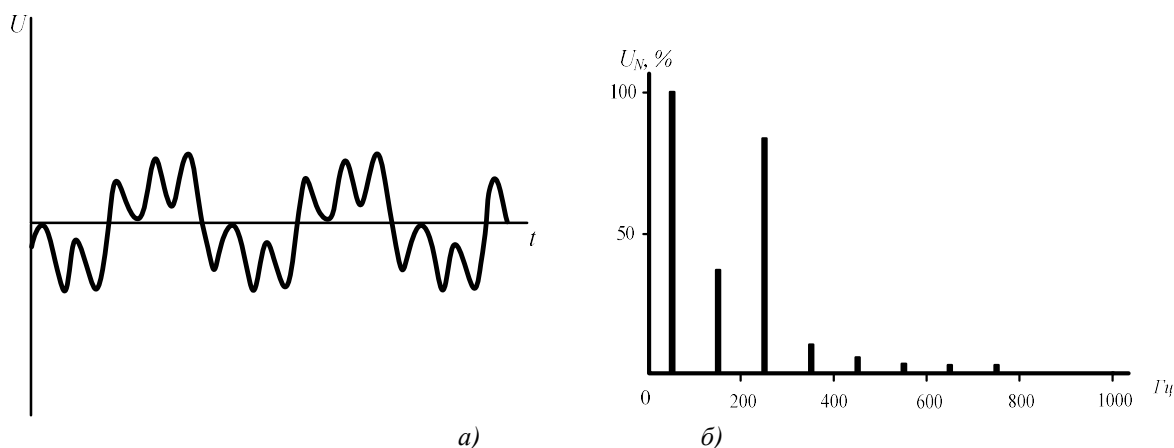


Рисунок 2 - Осциллограмма ТСФ1 (а) и спектр напряжения ДН (б) при токе подмагничивания  $0,2 I_{п.маx}$

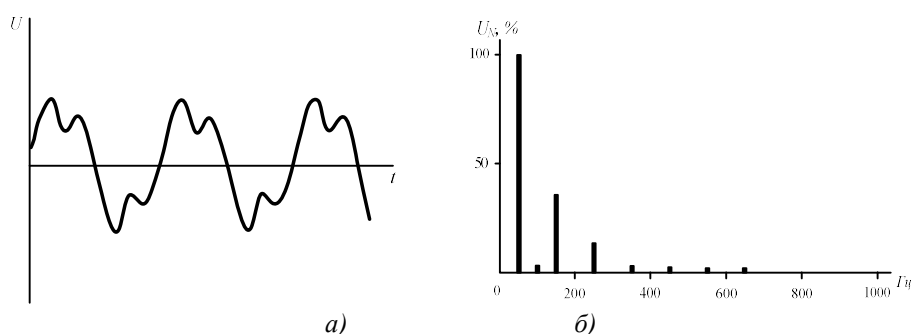


Рисунок 3 - Осциллограмма ТСФ 2(а) и спектр напряжения ДН (б) при токе подмагничивания  $0,4 I_{n,max}$

Таблица 1 - Энергетический баланс ИЭТУ с пятью СИ общей мощностью 1250 Вт при  $h=240$  мм

Электрический режим	$P_{тр}$ , Вт	$P_{дн}$ , Вт	$P_{п-изл}$ , Вт	$I_n$ , о.е.	$P_{изл}$ , Вт
Ток 50 Гц	21	-	1154	-	22,99
ТСФ1	11	10	1154	$0,2 I_{n,max}$	24,2
ТСФ2	11	9,0	1154	$0,4 I_{n,max}$	26,1

В проведенных экспериментах датчик перемещался по горизонтальной оси. На облучаемой поверхности зрительно выделяли кольца одинаковой освещенности и отмечали точки внутреннего и внешнего радиуса: точки радиуса  $r$  колец на расстоянии 5, 83, 123, 182 и 240 мм от центра. Эскиз облучаемой поверхности и направление перемещения датчика показаны на рисунке 4 [7], там же дано расположение точек на облучаемой поверхности.

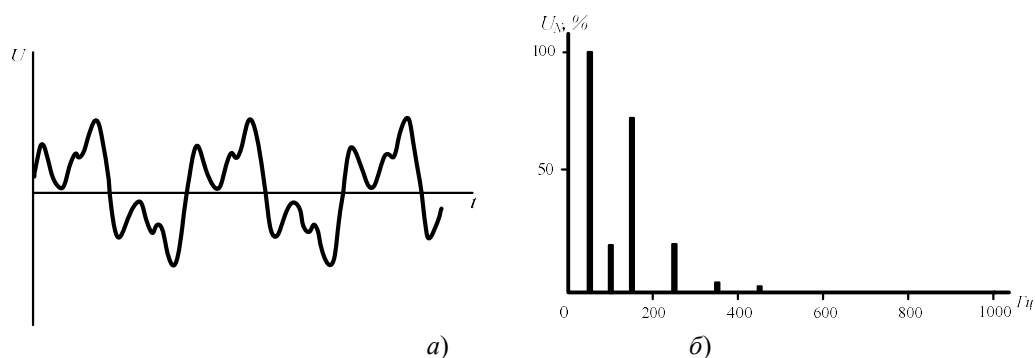


Рисунок 4 - Осциллограмма ТСФ (а) и б) спектр напряжения при токе подмагничивания  $0,6 I_{n,max}$

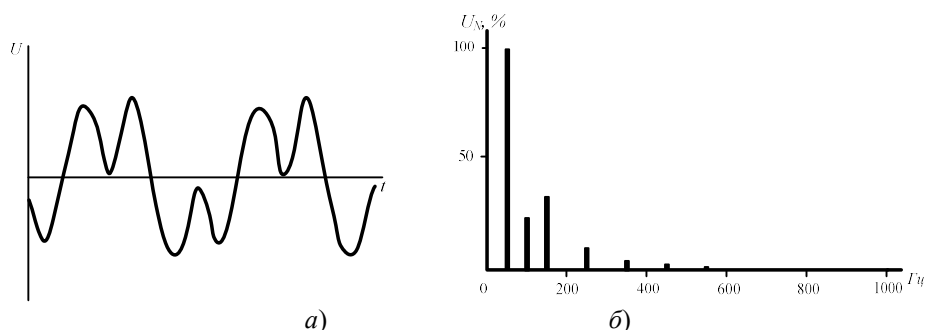


Рисунок 5 - Осциллограмма ТСФ (а) и б) спектр напряжения при токе подмагничивания  $0,8 I_{n,max}$

### Результаты экспериментов

Исследованиями установлено влияние электрических режимов ИЭТУ на величину потерь мощности в трансформаторах, ДН, излучателях. Снижение потерь мощности в указанных элементах оборудования ИП позволяет говорить о повышении КПД ИЭТУ.

Мощность из сети поддерживали постоянной. В режиме с переменным током частотой 50 Гц активная мощность, потребляемая из сети, составила 1175 Вт. Она покрывает потери в трансформаторе 21 Вт и потери в излучателях. В трансформаторе  $P_{тр}$ , Вт потери мощности составляют не более 1 % (см. рисунок 3). Излучатели потребляют 1154 Вт ( $P_{п.изл}$ ). На выходе излучателей (Изл) формируется поток излучения, направляемый к нагреваемому изделию (или облучаемой поверхности (ОП)). На мощность потока излучения в режиме при токе 50 Гц  $P_{изл}$  приходится порядка 23 Вт. В [6] показана целесообразность применения гармонических составляющих тока для воздействия на энергетические характеристики излучателей. Оценка составляющих энергетического баланса на примере ИЭТУ со СИ 1250 Вт при питании ТСФ1 дана на рисунке 6. Активная мощность из сети 1175 Вт, а потери, соответственно, 11 Вт, 9 Вт и 1154 Вт. При ТСФ2 мощность потока излучения, составила 26,1 Вт, то есть 2,3 %.

Подтверждены результаты, изложенные в [4, 7, 8]: потери мощности в трансформаторе  $P_{тр}$  в режиме с ТСФ снижаются за счет работы трансформатора на более низкой ступени РПН, меньшем потреблении тока из сети, снижения суммарной индуктивности обмоток трансформатор при уменьшении полей рассеяния и составляют порядка 1 %.

В работе исследована плотность потока излучения в ИЭТУ при различных электрических режимах. При помощи программного продукта Microsoft Excel выполнена статистическая обработка результатов экспериментов. Границы доверительного интервала (величину абсолютной ошибки) определяли с учетом коэффициента Стьюдента, который соответствует максимальному отклонению среднего арифметического от истинного значения, для доверительной вероятности 0,95 и с учетом числа выполненных повторений экспериментов. Плотность потока излучения дана в таблице 2 и на рисунке 7 а) и б) при высоте подвеса излучателя  $h=480$  мм и  $h=240$  мм. Доверительный интервал плотности потока излучения,  $\text{мкВт}/\text{см}^2$ , например, для тока 50 Гц при  $r = 0$  см [7880; 7725], для ТСФ1 при  $r = 0$  см [7797; 7953], для ТСФ2 при  $r = 0$  см [8029; 7871]. Значения мощности излучения для разных режимов работы ИЭТУ представлены в таблице 3. Доказано экспериментально, что, изменяя электрический режим, можно менять мощность излучения.

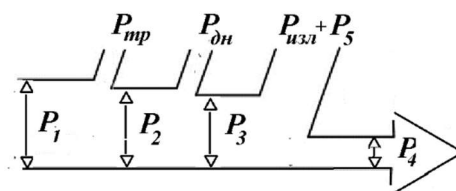


Рисунок 6 – Энергетический баланс ИЭТУ со СИ

Таблица 2 – Результаты измерений плотности потока излучения ( $p$ ,  $\text{мкВт}/\text{см}^2$ ) светлого излучателя на облучаемой поверхности в исследуемых режимах работы излучателя

$h = 480$ мм			
$r$ , см	50 Гц	ТСФ1	ТСФ2
	$p$ , $\text{мкВт}/\text{см}^2$		
0	7803	7875	7950
5	7100	7400	7600
8,3	6600	6900	7200
12,3	6200	6500	6800
18,7	5800	6100	6350
24	5000	5300	5500

Таблица 3 - Результаты исследования мощности излучения светлого излучателя на облучаемой поверхности в исследуемых режимах работы

Режимы	r, см					P, Вт
	0-5	5-8,3	8,3-12,3	12,3-18,7	18,7-24	
	Pi, Вт					
50 Гц	0,58	0,92	1,60	3,68	3,84	10,61
ТСФ 1	0,62	1,05	1,88	4,24	4,19	11,97
ТСФ 2	0,62	1,06	1,90	4,30	4,30	12,17

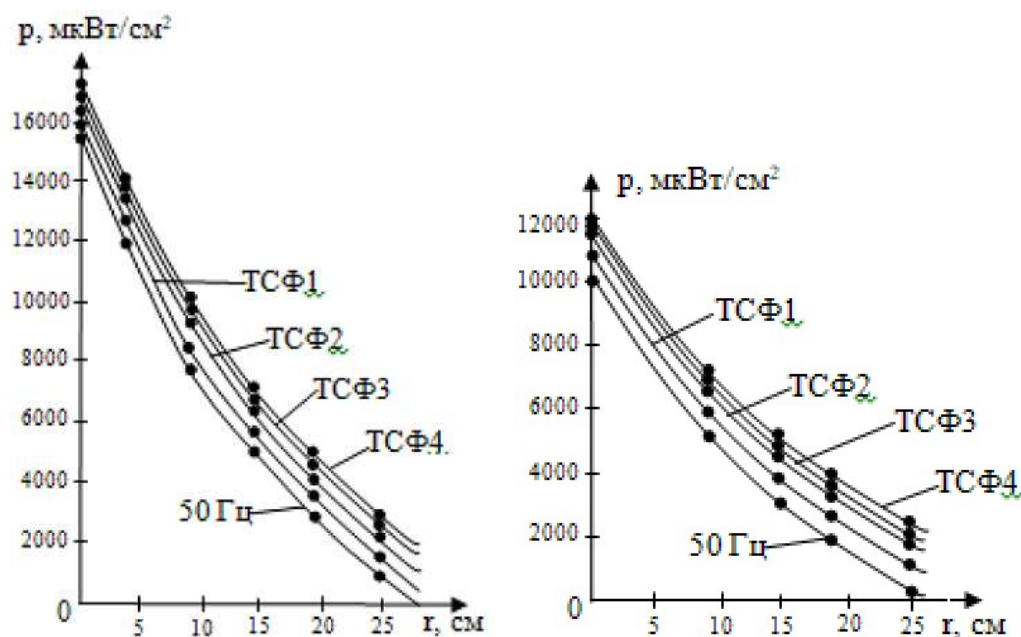


Рисунок 7 - Плотность потока излучения на облучаемой поверхности при высоте подвеса:  
а) 240 и б) 480 мм для исследуемых режимов 50 Гц, ТСФ1, ТСФ2, ТСФ3, ТСФ4

### Основные результаты работы

Создан стенд для проведения экспериментальных исследований и разработана методика проведения экспериментов для оценки энергетической эффективности применения питания ТСФ в ИЭТУ по сравнению с синусоидальным током 50 Гц.

Установлено, что в излучательной ЭТУ в исследуемых режимах при условии одинаковой активной мощности, потребляемой из сети, снижаются потери энергии. Доказано, что, изменяя режим питания излучателей в ИЭТУ, можно снижать потери активной мощности при работе трансформатора на более низкой ступени РПН, потери в ДН – при регулировании тока подмагничивания, в излучателях, при воздействии на протекающие процессы электромагнитной составляющей наряду с температурной, что обуславливает повышение КПД ИЭТУ. Наиболее эффективным является режим с питанием ТСФ2, который позволяет при изменении подмагничивания ДН получать более равномерный обогрев при снижении потерь в элементах оборудования, то есть дает наиболее существенные изменения энергоэффективности работы ИЭТУ [4, 7-8].

На основе экспериментальных исследований и последующих расчетов выполнена оценка плотности потока излучения (попадающей на облучаемую поверхность). Сравнительный анализ разных режимов (питание ИЭТУ током 50 Гц, ТСФ1 и ТСФ2 и др. показал, что появляется возможность регулировать плотность потока излучения излучателя на облучаемой поверхности, например, при ТСФ1 на 4 % и ТСФ2 порядка 10 % по сравнению с током 50 Гц. Для повышения энергоэффективности ИЭТУ со светлыми инфракрасными излучателями целесообразным является режим с питанием ТСФ2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург, А.С., Ляховицкий Б.М. Генераторы инфракрасного излучения для пищевой промышленности. Москва: ЦНИИТЭИ Легпищемаш, 1971. 71 с.
2. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике. В 4-х томах. Москва: Мир, 1995-1999. С. 15-17.
3. Кувалдин, А.Б., Погребиский, М.Я., Федин, М.А. Электротехнологические установки и системы: учебник. – Москва: Издательство МЭИ, 2023. С. 47-113.
4. Птицына, Е.В. Разработка основ теории и электрических режимов электролизных и газоразрядных установок при питании током сложной формы: автореферат дисс. на соискание ученой степени д.т.н. Москва: МЭИ, 2007. 20 с.
5. Бутырин, П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и

виртуальные приборы на основе LabView / П.А. Бутырин. Москва: ДМК Пресс, 2005. 264 с.

6. Татевосян, А.С. Исследование магнитных и электрических характеристик электротехнических устройств с применением программного обеспечения LabView / А.С. Татевосян и др.: Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2014. 88 с.: ил.

7. Птицына, Е.В., Птицын, Д.В., Кувалдин, А.Б. Методика экспериментального определения энергетических характеристик излучателей при питании током сложной формы / Е.В. Птицына и др. // Промышленная энергетика. 2023. №4. С. 16-20.

8. Птицын, Д.В., Птицына, Е.В. Исследование энергетических характеристик дросселей насыщения, используемых в излучательных электротехнологических установках с темными и светлыми инфракрасными излучателями для питания током сложной формы. Наука России: цели и задачи: материалы XLII международной науч.-практ. конф. (5 февраля). Екатеринбург, 2024. 8 с.

9. Васильев, Л.С. Расчет потерь в стали при несинусоидальной форме кривой напряжения питания / Л.С. Васильев, и др. // Электротехника. 1970. № 11. С. 46-49.

10. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1. Общие вопросы.: Электротехнические материалы / Под ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. 9-е изд., стер. Москва: Издательство МЭИ, 2003. 440 с., ил. С. 362-392.

11. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия: В 4 кн. / под общ.ред. член-корр. РАН А.В. Клименко и проф. Зорина. 5-е изд., стереот. Москва: Издат. дом МЭИ, 2022. Кн. 4: Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. 631 с., ил. JSBN 948-5-383-01548-3

**Птицына Елена Витальевна**

Омский государственный  
технический  
университет г. Омск  
доктор технических наук, доцент,  
профессор  
кафедра «Теоретическая и общая  
электротехника»  
644050, Российская Федерация, г.  
Омск, пр-т Мира, д. 11  
Тел. +7 (3812) 65-36-35  
E-mail: evptitsyna@yandex.ru

**Птицын Дмитрий Вячеславович**

Омский государственный  
технический  
университет г. Омск  
кафедра «Теоретическая и общая  
электротехника»  
644050, Российская Федерация, г.  
Омск, пр-т Мира, д. 11  
Тел. +7 (3812) 65-36-35  
E-mail: ptitsyndv@mail.ru

**Кувалдин Александр Борисович**

НИУ «Московский энергетический  
институт»  
г. Москва  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор  
технических наук, профессор  
кафедры  
«Электроснабжение  
промышленных  
предприятий и электротехнология»  
111250, г. Москва, вн. тер. г.  
муниципальный  
округ Лефортово, ул.  
Красноказарменная, д. 14,  
стр. 1.  
Тел. +7 (495) 362-73-86  
E-mail: a.kuvaldin2013@yandex.ru

---

PTITSYNA E.V., PTITSYN D.V., KUVALDIN A.B.

## **COMPARISON OF ENERGY INDICATORS OF RADIATIVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS POWERED BY COMPLEX WAVEFORM CURRENT AND INDUSTRIAL FREQUENCY CURRENT**

**Abstract.** *The paper researches the energy balance in radiative electrotechnological installation with different types of radiators for 50 Hz alternating current supply and complex waveform current. It is shown that the use of a complex current to power the radiators reduces power losses in the power supply: in the transformer, due to operation at a lower stage of the on-load tap changer compared with power supply with a sinusoidal current of industrial frequency; in the saturation choke - when regulating the magnetization current. The reduction of power losses in light radiators with simultaneous exposure to temperature and electromagnetic components has been confirmed.*

**Keywords:** *radiative electrotechnological installation, light radiators, transformer, saturation choke, complex waveform current, energy balance.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Ginzburg, A.S., Lyakhovitskiy B.M. Generatory infrakrasnogo izlucheniya dlya pishchevoy promyshlennosti. Moskva: TsNIITEI Legpishchemash, 1971. 71 s.

2. Volf U., Tsisis G. Spravochnik po infrakrasnoy tekhnike. V 4-kh tomakh. Moskva: Mir, 1995-1999. S. 15-17.
3. Kuvaldin, A.B., Pogrebisskiy, M.Ya., Fedin, M.A. Elektrotekhnologicheskie ustanovki i sistemy: uchebnyk. – Moskva: Izdatelstvo MEI, 2023. S. 47-113.
4. Ptitsyna, E.V. Razrabotka osnov teorii i elektricheskikh rezhimov elektroliznykh i gazorazryadnykh ustanovok pri pitanii tokom slozhnoy formy: avtoreferat diss. na soiskanie uchenoy stepeni d.t.n. Moskva: MEI, 2007. 20 s.
5. Butyrin, P.A. Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy i eksperimenta: kompyuternye izmereniya i virtualnye pribory na osnove LabView / P.A. Butyrin. Moskva: DMK Press, 2005. 264 s.
6. Tatevosyan, A.S. Issledovanie magnitnykh i elektricheskikh kharakteristik elektrotekhnicheskikh ustroystv s primeneniem programmnoy obespecheniya LabView / A.S. Tatevosyan i dr.: Minobrnauki Rossii, OmGTU. Omsk: Izd-vo OmGTU. 2014. 88 s.: il.
7. Ptitsyna, E.V., Ptitsyn, D.V., Kuvaldin, A.B. Metodika eksperimentalnogo opredeleniya energeticheskikh kharakteristik izluchateley pri pitanii tokom slozhnoy formy / E.V. Ptitsyna i dr. // Promyshlennaya energetika. 2023. №4. S. 16-20.
8. Ptitsyn, D.V., Ptitsyna, E.V. Issledovanie energeticheskikh kharakteristik drossелей насыщения, исползуемых в излучательных электротехнологических установках с темными и светлыми инфракрасными излучателями для питания токoм сложной формы. Nauka Rossii: tseli i zadachi: materialy XLII mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. (5 fevralya). Ekaterinburg, 2024. 8 s.
9. Vasilyev, L.S. Raschet poter v stali pri nesinusoidalnoy forme krivoy napryazheniya pitaniya / L.S. Vasilyev, i dr. // Elektrotehnika. 1970. № 11. S. 46-49.
10. Elektrotekhnicheskii spravochnik: V 4 t. T.1. Obshchie voprosy.: Elektrotekhnicheskie materialy / Pod red. Professorov MEI V.G. Gerasimova i dr. 9-e izd., ster. Moskva: Izdatelstvo MEI, 2003. 440 s., il. S. 362-392.
11. Teploenergetika i teplotekhnika: spravochnaya seriya: V 4 kn. / pod obshch.red. chlen-korr. RAN A.V. Klimenko i prof. Zorina. 5-e izd., stereot. Moskva: Izdat. dom MEI, 2022. Kn. 4: Promyshlennaya teploenergetika i teplotekhnika. 631 s., il. JSBN 948-5-383-01548-3

**Ptitsyna Elena Vitalevna**

Omsk state technical university,  
Omsk  
doctor of science, docent, professor at  
the department of  
«Theoretical and general electrical  
engineering»  
644050, Mira, h. 11 Omsk, Russian  
Federation  
Ph. +7 (3812) 65-36-35  
E-mail: evptitsyna@yandex.ru

**Ptitsyn Dmitry Vyacheslavovich**

Omsk state technical university,  
Omsk  
senior lecturer at the department of  
«Theoretical  
and general electrical engineering»  
644050, Mira, h. 11 Omsk, Russian  
Federation  
Ph. +7 (3812) 65-36-35  
E-mail: ptitsyndv@mail.ru

**Kuvaldin Alexandr Borisovich**

National Research University  
"Moscow Power  
Engineering Institute", Moscow  
honored scientist of the Russian  
Federation, doctor  
of science, docent, professor at the  
department of  
Electrotechnologies»  
111250, Krasnokazarmennaya 14,  
build. 1,  
Moscow, Russia Federation  
Ph. +7 (495) 362-73-86  
E-mail: a.kuvaldin2013@yandex.ru

© Птицына Е.В., Птицын Д.В., Кувалдин А.Б., 2025

РЕШЕТНЯК С.Н.

## К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

**Аннотация.** В публикации рассмотрены вопросы обоснования критериев рационализации систем электроснабжения применительно к условиям угольных шахт. Кроме того, представлен разработанный алгоритм расчета системы электроснабжения угольной шахты, с целью ее рационализации и учетом декомпозиции сетей поверхностного и подземного комплекса, а также учетом влияния высших гармонических составляющих.

**Ключевые слова:** угольная шахта, система электроснабжения, декомпозиция, алгоритм рационализации, гармонический состав электрической сети, критерии рационализации.

### Введение

Специфика функционирования угольных шахт высокой производительности, состоящая в непрерывном перемещении забоев выемочных и проходческих участков и в наличии опасных компонентов в рудничной атмосфере, приводит к значительному отклонению реальных схем электроснабжения угольных шахт от проектных разработок, выполненных на момент сдачи шахты в эксплуатацию [1, 2]. Перемещение забоев выемочных и проходческих участков обуславливает периодическое изменение схем электроснабжения, что ограничивает область применения типовых схем. Ввиду того, что схемы электроснабжения угольных шахт являются развивающимися системами, находящимися под стохастическими воздействиями. Под этим воздействием следует понимать процесс, поведение которого не является детерминированным, и последующее состояние такой системы описывается величинами, которые могут быть как предсказанными, так и случайными. Именно это явление определяет различия в схемных решениях для похожих горно-геологических условий и одинаковой системы разработки угольных пластов [3]. Условия эксплуатации и воздействие различных факторов, в том числе субъективных, приводят к разнообразию схемных решений систем электроснабжения угольных шахт, которые не могут быть охарактеризованы по общим показателям.

### Основная часть

Система электроснабжения угольной шахты обладает свойством целостности, как по функциональному назначению, так и по единству электромагнитных и электромеханических процессов [4, 5, 6]. В составе системы электроснабжения могут быть выделены отдельные элементы, обладающие относительной автономией с точки зрения особенностей характеристик и функций, выполняемых этими элементами. К таким элементам могут быть отнесены элементы электрических сетей, являющихся важнейшим компонентом системы электроснабжения. Основным функциональным назначением электрических сетей является распределение и передача электроэнергии, которая сопровождается потерями, меняющими "энергетическую" компоненту электроэнергии.

Под "энергетической" компонентой состояния сети понимаются: ряд электротехнических параметров (включая потери активной и реактивной мощности и т.д.), а также влияние высших гармонических составляющих напряжения и тока.

Электрическая сеть является материальным объектом, требующим для всего создания определенного объема цветного металла, обладающая определенным весом, характеризующаяся используемым материалом проводников и другими характеристиками "материальной" компоненты состояния сети.

Несмотря на то, что системы электроснабжения горных и общепромышленных предприятий подобны с точки зрения основных электротехнических процессов, проблема многокритериальности для системы электроснабжения угольной шахты, в том числе опасной по внезапным выбросам газа и пыли, особенно актуальна в связи со значительным многообразием внешних условий, динамики и назначений электрических сетей. Обобщенный алгоритм расчета системы электроснабжения угольной шахты представлен на рисунке 1. Первый этап включает в себя информационные аспекты по параметрам системы электроснабжения угольной шахты, а также определения расчетных нагрузок. Следующий этап – выбор и предварительный расчет критериев рационализации систем электроснабжения угольной шахты. Согласно имеющимся методик, производится расчет выбранных критериев энергетического и экономического характера (рисунок 2). В случае получения достаточного

уровня по критериям рационализации происходит уточненный расчет критериев и построения имитационной модели электротехнической системы угольной шахты в одном из программных продуктов, например, в Matlab или Sintech. В случае получения недостаточного уровня рационализации происходит возврат на этап предварительного расчета критериев рационализации системы электроснабжения угольной шахты.

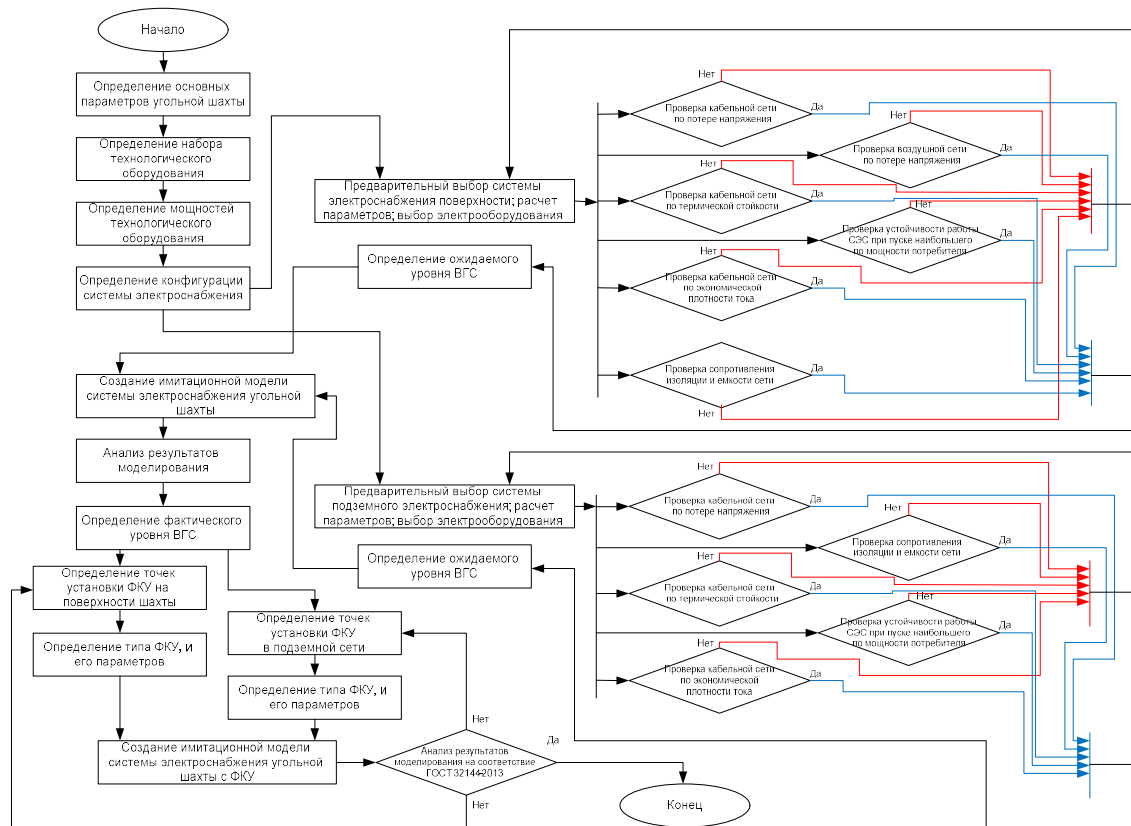


Рисунок 1 – Алгоритм расчета системы электроснабжения угольной шахты

После проведения моделирования системы электроснабжения угольной шахты осуществляется принятие решения о соответствии ее ожидаемым показателям, согласно критериям рационализации, или нет.

В случае соответствия ожидаемым показателям – завершение мероприятий, в случае несоответствия – возврат на этап предварительного расчета критериев рационализации. Задача проектирования рациональных систем электроснабжения угольной шахты, в том числе опасной по внезапным выбросам газа и пыли, является многокритериальной задачей, и всегда существуют несколько, в той или иной степени, противоречащих друг другу критериев.

Наличие ограничений технического или экономического характеров в виде ресурсов меняет процесс нахождения рационального решения.

Функционирование электрических сетей разнообразного назначения и пожароопасные условия окружающей среды позволяют рассматривать в качестве одного из критериев рационализации «энергетического пространства» выступают потери активной мощности в сети.

$$\frac{\min}{F} \Delta P_c = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^L \frac{P_i^2 \rho_i l_i}{U_{ni}^2 \cos^2 \varphi_i F_i} = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^L \frac{A_i}{F_i}, \quad (1)$$

где  $L$  – число ветвей схемы сети;  $P_i$  – активная мощность, передаваемая ветви;  $\rho_i$  – удельное сопротивление материала  $i$  – ветви;  $l_i$  – длина ветви;  $U_{ni}$  – номинальное напряжение  $i$  – ветви;  $\cos \varphi_i$  – коэффициент мощности  $i$  – ветви;  $F_i$  – сечение  $i$  – ветви – рационализируемый параметр, стандартизированная переменная (при решении задач можно считать  $F$ , непрерывной величиной). Выбор в качестве критерия рационализации системы электроснабжения угольной шахты – значение потерь активной мощности соответствует современным тенденциям энергосберегающих технологий.

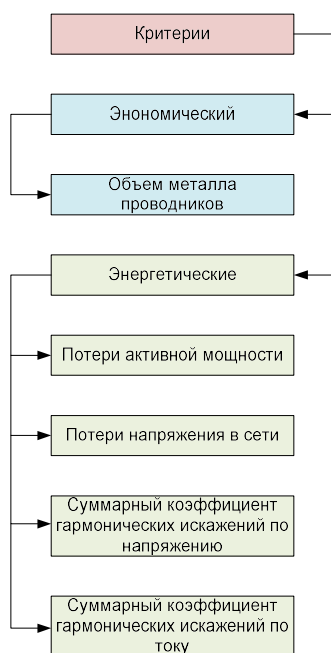


Рисунок 2 – Критерии рационализации системы электроснабжения угольной шахты

Мероприятия по минимизации потерь активной мощности на стадии проектирования сетей приводят к снижению стоимости теряемой электроэнергии в сетях горного предприятия за счет уменьшения затрат на расширение сети для покрытия потерь, уменьшению затрат на развитие питающих энергосистем, улучшаются экономические показатели сети. Достигаются при этом экологические и социальные эффекты. Следовательно, использование целевой функции можно обосновать:

- созданием сетей с минимальными потерями активной мощности, что является актуальной народнохозяйственной задачей;
- выбор данной целевой функции определяет условия взрыво- и пожаробезопасности, экономичности сети, связан с надежностью работы электрооборудования и условиями электробезопасности, может влиять на условия безопасности по другим горнотехническим факторам.

Одним из основных критериев оценки эффективности системы электроснабжения угольной шахты «материального пространства» является объем металла проводников сети:

$$\frac{\min}{F} V_c = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^L 3F_i l_i = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^L A_i F_i. \quad (2)$$

Использование этого критерия подразумевает металлоемкость, вес сети, что весьма важно для угольных шахт высокой производительности с большим периметром шахтного поля. Расход цветного металла в электрических сетях современных угольных составляет 400 – 450 тонн, а в перспективе, учитывая существующие тенденции развития шахтных полей, роста производительности шахт, установленной мощности электрооборудования, увеличения длины шахтных сетей – расход цветного металла будет только увеличиваться. Поэтому необходимость экономии цветного металла в шахтных электрических сетях очевидна, а рассматриваемый критерий актуален.

Критериями «энергетического пространства», отражающим показатели качества электроэнергии (ПКЭ), являются отклонения напряжения и гармонический состав сети. Следует отметить, что гармонический состав в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт, практически не рассматривался [7 – 10]. Однако, увеличение числа технологического оборудования угольных шахт, использующих регулируемые электропривода с преобразовательными устройствами, вынуждает уделять этому критерию значительное внимание.

Целевую функцию задачи минимизации потерь напряжения на каждом из независимых путей схемы сети в виде:

$$\frac{\min}{F} \Delta U_{pi}^* = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^{ki} \frac{P_i r_i + Q_i x_i}{U_{ni}^2}, \quad (3)$$

где  $ki$  - число ветвей в  $i$  - пути;  $P_i$  и  $Q_i$  - активная и реактивная мощности, передаваемые по  $i$  ветви;  $r_i$  и  $x_i$  - активное и реактивное сопротивления  $i$  ветви. Однако для условий системы электроснабжения угольной шахты, в частности для подземной ее части, как правило, число ветвей равно 1.

Целевую функцию по критерию «энергетического пространства», отражающим показатели качества электроэнергии (ПКЭ), в частности суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению  $K_U$ , можно записать в следующем виде:

$$\frac{\min}{F} K_{Ui} = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^{ki} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1^2}} \times 100\%, \quad (4)$$

где  $ki$  - число ветвей в  $i$  - пути к обособленной нагрузки (потребителю угольной шахты), получающей питание от одной секции шин (или энергопоезда);  $n$  - номер гармоники;  $U_1$  - уровень напряжения первой (основной) гармоники, В;  $U_n$  - уровень напряжения  $n$  - ной гармоники, В;

Целевую функцию по критерию «энергетического пространства», отражающим показатели качества электроэнергии (ПКЭ), в частности суммарный коэффициент гармонических искажений по току  $K_I$ , можно записать в следующем виде:

$$\frac{\min}{F} K_{Ii} = \frac{\min}{F} \sum_{i=1}^{ki} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{I_n^2}{I_1^2}} \times 100\%, \quad (5)$$

где  $ki$  - число ветвей в  $i$  - пути к обособленной нагрузки (потребителю угольной шахты), получающей питание от одной секции шин (или энергопоезда);  $n$  - номер гармоники;  $I_1$  - уровень тока первой (основной) гармоники, А;  $I_n$  - уровень тока  $n$  - ной гармоники, А.

### Заключение

Критерий рационализации должен содержать условия поддержания определенных величин качества электроэнергии, при которых получена базовая величина приведенных затрат. Приведенными затратами выступает ресурс системы электроснабжения угольной шахты. Если при заданном ресурсе за счет минимизации потерь активной мощности, потерь напряжения, влияния гармоник высших порядков, объема металла получают снижение заданных затрат, то это снижение и может быть принято в качестве эффективности системы электроснабжения угольной шахты.

Следует отметить, что гармонический состав сети, питающей потребителей угольных шахт, в том числе подземных, также в значительной степени влияет как на энергетические критерии, так и на экономические критерии, поэтому данными параметрам качества электрической энергии следует уделять внимание.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плащанский Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий // Учебник для ВУЗов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 499 с.
2. Миновский Ю.П. Эффективность электроснабжения угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 158 с.
3. Кубрин С.С., Захаров В.Н. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5-2. С. 31-47.
4. Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. 2022;7(1):66-77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>.
5. Ляхомский А.В., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Анализ гармонического состава напряжения в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Промышленная энергетика. 2021. № 10. С. 32-41.
6. Пивняк Г.Г., Зайка В.Т., Самойленко В.В. Научные и методические основы эффективного использования электроэнергии на угольных шахтах Украины // Горный журнал. 2010. № 7. С. 92-96.
7. Sychev Y.A., Aladin M. E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023; (11):159-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_11\_0\_159.
8. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., “Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, Number 4, Mar. 2016, pp. 2640 – 2645.
9. Prokhorova V.B., Sychev Y.A., “The control system on the base of signal processing for power quality improvement in electrotechnical complexes of alternative and renewable power sources”, In Proceedings of 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), 26-29 September 2016, pp. 119 – 124.

10. Lyakhomskii, A.; Petrochenkov, A.; Romodin, A.; Perfileva, E.; Mishurinskikh, S.; Kokorev, A.; Kokorev, A.; Zuev, S. Assessment of the Harmonics Influence on the Power Consumption of an Electric Submersible Pump Installation. *Energies* 2022, 15, 2409. <https://doi.org/10.3390/en15072409>.

**Решетняк Сергей Николаевич**

ФБУН ИПКОН РАН

доц., к.т.н., ст. научн. сотр. лаб. 2.2

111020 Москва Крюковский тупик д.4

E-mail: reshetniak@inbox.ru

---

RESHETNYAK S.N.

## ON THE ISSUE OF SUBSTANTIATION OF RATIONALIZATION CRITERIA COAL MINE POWER SUPPLY SYSTEMS

**Abstract.** *The publication discusses the issues of substantiation of criteria for rationalization of power supply systems in relation to the conditions of coal mines. In addition, the developed algorithm for calculating the power supply system of a coal mine is presented, in order to rationalize it and take into account the decomposition of networks of the surface and underground complex, as well as taking into account the influence of higher harmonic components.*

**Keywords:** *coal mine, power supply system, decomposition, rationalization algorithm, harmonic composition of the electric network*

### BIBLIOGRAPHY

1. Plaschansky L. A. Fundamentals of power supply of mining enterprises // Textbook for universities. – M.: Publishing House of the Moscow State Mining University, 2005. – 499 p.
2. Minovsky Yu.P. Efficiency of power supply of coal mines. – M.: Nedra, 1990. – 158 p.
3. Kubrin S.S., Zakharov V.N. Digital transformation and intellectualization of mining engineering systems. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2022. No. 5-2. pp. 31-47.
4. Plaschansky L.A., Reshetnyak S.N., Reshetnyak M.Yu. Improving the quality of electric energy in underground electric networks of high-performance coal mines // Mining sciences and technologies. 2022;7(1):66-77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>
5. Lyakhomsky A.V., Plaschansky L.A., Reshetnyak S.N., Reshetnyak M.Yu. Analysis of the harmonic composition of voltage in underground electric networks of high-performance coal mines // Industrial power engineering. 2021. No. 10. pp. 32-41.
6. Pivnyak G.G., Zaika V.T., Samoylenko V.V. Scientific and methodological foundations of efficient use of electricity in coal mines of Ukraine // Mining Journal. 2010. No. 7. pp. 92-96.
7. Sychev Y.A., Aladin M. E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in non-linearly loaded industrial power lines. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023; (11):159-181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_11\_0\_159.
8. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., “Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks”, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, Number 4, Mar. 2016, pp. 2640 – 2645.
9. Prokhorova V.B., Sychev Y.A., “The control system on the base of signal processing for power quality improvement in electrotechnical complexes of alternative and renewable power sources”, In Proceedings of 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), 26-29 September 2016, pp. 119 – 124.
10. Lyakhomskii, A.; Petrochenkov, A.; Romodin, A.; Perfileva, E.; Mishurinskikh, S.; Kokorev, A.; Kokorev, A.; Zuev, S. Assessment of the Harmonics Influence on the Power Consumption of an Electric Submersible Pump Installation. *Energies* 2022, 15, 2409. <https://doi.org/10.3390/en15072409>.

**Reshetnyak Sergey Nikolaevich**

FBUN IPCON RAS

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,

Senior researcher lab. 2.2

111020 Moscow Kryukovsky t. 4

E-mail: reshetniak@inbox.ru

© Решетняк С.Н., 2025

ЧЕРНЫШОВ В.А., КОРОЛЕВА Т.Г., АСТАФЬЕВ Н.А.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКА ИСКУССТВЕННОГО ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В ВОЗДУШНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 кВ с ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

**Аннотация.** Обосновывается необходимость разработки математического сопровождения для разработанных авторами схемотехнических решений, основанных на формировании искусственного двойного замыкания на землю, обеспечивающего оперативное выявление, отключение или гальваническое отделение воздушных линий электропередачи 10 кВ, имеющих повреждение изоляции, а также перевода развивающихся двойных замыканий на землю в однофазные. Рассматривается методика расчета тока искусственного двойного замыкания на землю основанная на использовании теории симметричных составляющих.

**Ключевые слова:** воздушная электрическая сеть 10 кВ с изолированной нейтралью; однофазное повреждение изоляции; несимметричный режим работы, искусственное двойное замыкание на землю, метод симметричных составляющих, схема замещения, токи прямой, обратной и нулевой последовательности.

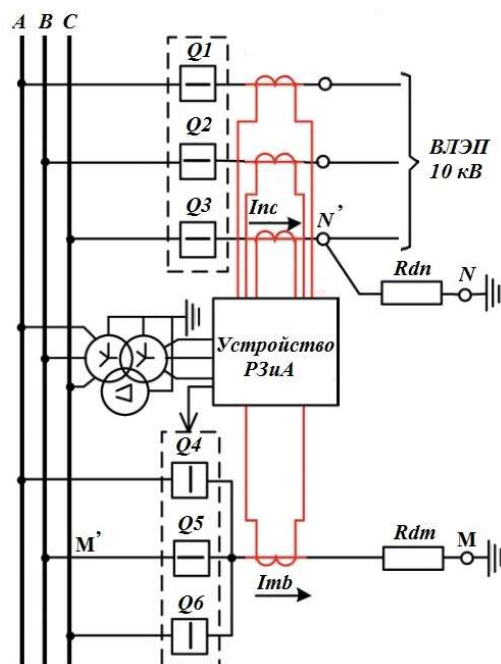
### Введение

С целью повышения эффективности функционирования воздушной электрической сети (ВЭС) 10 кВ с изолированной нейтралью, научным сообществом разработаны различные способы и устройства, в том числе и обеспечивающие надежную, безопасную и эффективную работу воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) 10 кВ, работающих с поврежденной изоляцией. К отдельной категории изобретений можно отнести способы [1-6], основанные на реализации серии кратковременных искусственных двойных замыканий на землю (ДЗНЗ), формируемых и контролируемых устройствами РЗиА, в целях оперативного выявления, отключения или гальванического отделения ВЛЭП 10 кВ, имеющих однофазное замыкание на землю (ОЗНЗ), а также перевода развивающихся двойных замыканий на землю (ДЗНЗ) в ОЗНЗ. Важно отметить, что для практической реализации отмеченных способов необходимо иметь соответствующее математическое сопровождение, устанавливающее взаимосвязь между формируемым током искусственного ДЗНЗ и влияющими на него значениями сопротивлений следующих элементов ВЭС 10 кВ: проводников ВЛЭП, токоограничивающего резистора, дефектного изолятора, заземляющих устройств. Следует отметить, что расчет величины тока искусственного ДЗНЗ очень важен для обеспечения безопасной и надежной работы ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью в условиях повреждения ее изоляции. На основании данного расчета инженерным персоналом осуществляется выбор защитных аппаратов, а также производится оценка уровня напряжений и токов в ВЭС 10 кВ при возникновении в ней аварийных ситуациях.

Учитывая, что точность расчета тока искусственного ДЗНЗ влияет на правильность выбора защитного оборудования в ВЭС 10 кВ и соответственно гарантирует эффективность: идентификации, отключения, гальванического отделения ВЛЭП 10 кВ, имеющих ОЗНЗ, а также устранения возникновения в них развивающихся ДЗНЗ, то результаты научных исследований, направленные на ее достижение являются важными и востребованными.

### Основная часть

Для расчета тока искусственного ДЗНЗ будет использоваться метод симметричных составляющих [7]. Данный метод позволяет значительно упростить анализ сложных несимметричных режимов в электрических сетях, сводя их к решению нескольких более простых симметричных задач. В основе метода лежит разложение трехфазных токов и напряжений на 3-ри симметричные системы: положительную, отрицательную и нулевую последовательности. Каждая из этих последовательностей характеризуется своими параметрами и взаимодействует по-разному с элементами ВЭС 10 кВ. Для определения параметров режима ДЗНЗ в ВЭС 10 кВ представим расчетную схему искусственного ДЗНЗ (см. рисунок 1). Данная схема учитывает все основные элементы ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью: шинопровод, проводники, заземляющие устройства, а также устройство РЗиА.



**Рисунок 1 - Расчетная схема реализации искусственного ДЗНЗ в ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью**

Ключевым моментом при расчете тока искусственного ДЗНЗ является корректный учет граничных условий, в данном случае, задачей является определение токов короткого замыкания при замыкании 2-х фаз (в частности А и В) на землю через переходное сопротивление. При этом замыкание фазы А на землю происходит вследствие естественного пробоя изолятора, а замыкание фазы В на землю осуществляется коммутационным аппаратом через высокоомный резистор. При этом предполагается, что переходное сопротивление грунта в точках замыкания имеет чисто активный характер. Это является допущением, хотя в реальной ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью, переходное сопротивление грунта может обладать и реактивной составляющей, зависящей от таких факторов, как: тип и структура грунта, температура и влажность грунта, а также конфигурация заземляющего устройства [8].

Необходимо отметить, что игнорирование реактивной составляющей переходного сопротивления грунта может привести к некоторой погрешности в расчетах, но так как ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью обладают весьма низким уровнем индуктивности, то относительная погрешность расчета будет весьма незначительной.

С учетом вышеизложенного, получаем следующие выражения:

$$\text{Im}a = 0, \text{Im}c = 0, U m b = 0, U m' b = R d m \cdot \text{Im}b$$

$$Ina=0, Inb=0, Unc=0, Un'c = Rdn \cdot Inc$$

Токи в зонах М и N направлены навстречу друг другу, поэтому можем записать следующее равенство:

$$\text{Im}b = -\text{Inc} \quad (1)$$

Принимаем фазу А за особую, в которой не происходит изменения токов, в результате чего получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} Ia1 = \frac{1}{3} \cdot (Ia + a \cdot Ib + a^2 \cdot Ic) \\ Ia2 = \frac{1}{3} \cdot (Ia + a^2 \cdot Ib + a \cdot Ic) \\ Ia0 = \frac{1}{3} \cdot (Ia + Ib + Ic) \end{cases} \quad (2)$$

В поврежденных зонах присутствуют только токи  $I_b$  в области М, и  $I_c$  в области N, поэтому уравнение системы (2) для них будут выглядеть следующим образом:

Для области М:

$$\text{Im } a1 = \frac{1}{3} \cdot a \cdot Ib, (3) \quad \text{Im } a2 = \frac{1}{3} \cdot a^2 \cdot Ib, (4) \quad \text{Im } a0 = \frac{1}{3} \cdot Ib, (3)$$

Для области N:

$$Ina1 = \frac{1}{3} \cdot a^2 \cdot Ic, (6) \quad Ina2 = \frac{1}{3} \cdot a \cdot Ic, (7) \quad Ina0 = \frac{1}{3} \cdot Ic, \quad (4)$$

Выразим все симметричные составляющие токов через:

$$\operatorname{Im} a_0 = \frac{1}{3} \cdot Ib, \text{ или } Ib = 3 \cdot \operatorname{Im} a_0, \text{ тогда}$$

Из (3) получаем:  $\operatorname{Im} a1 = \frac{1}{3} \cdot a \cdot 3 \cdot \operatorname{Im} a0 = a \cdot \operatorname{Im} a0,$

Из (4) соответственно получаем:  $\text{Im } a_2 = a^2 \cdot \text{Im } a_0$ ,

Учитывая, что  $Ib = -Ic$

Из (5) получаем:  $3 \cdot \text{Im}a_0 = Ib$ ,

Из (8) получаем:  $3 \cdot I_{na0} = I_c = -I_b = -3I_{ma0}$ , т.е.  $I_{na0} = -I_{ma0}$ ,

Из (6) получаем:  $Ima1 = \frac{1}{3} \cdot a^2 \cdot Ic = -\frac{1}{3} \cdot a^2 \cdot Ib = -a^2 \cdot Im a0$ ,

Из (7) получаем:  $\operatorname{Im} a_2 = \frac{1}{3} \cdot a \cdot I_c = -\frac{1}{3} \cdot a \cdot I_b = -a \cdot \operatorname{Im} a_0$ .

Согласно теории симметричных составляющих можно записать следующие уравнения:

$$\text{Im} b_2 = \text{Im} b_1 \text{ или } \text{Im } a_2 = a \cdot \text{Im } a_1 \quad (5)$$

$$\text{Im}0 = \text{Im}b1 \quad \text{или} \quad \text{Im} \ 0 = a^2 \cdot \text{Im} \ a1 \quad (6)$$

$$Um'b1 + Um'b2 + Um'0 = 3Rdm \cdot Imb1$$

ИЛИ

$$a^2 \cdot Um'a1 + Um'a2 + Um'0 = 3Rdm \cdot a^2 \cdot \text{Im}a1 \quad (7)$$

$$Inc2 = Inc1 \text{ или } Ina2 = a^2 \cdot Ina1 \quad (8)$$

$$In0 = Incl \text{ или } In0 = a \cdot Ina1 \quad (9)$$

$$Un'c1 + Un'c2 + Un'0 = 3Rdn \cdot Incl$$

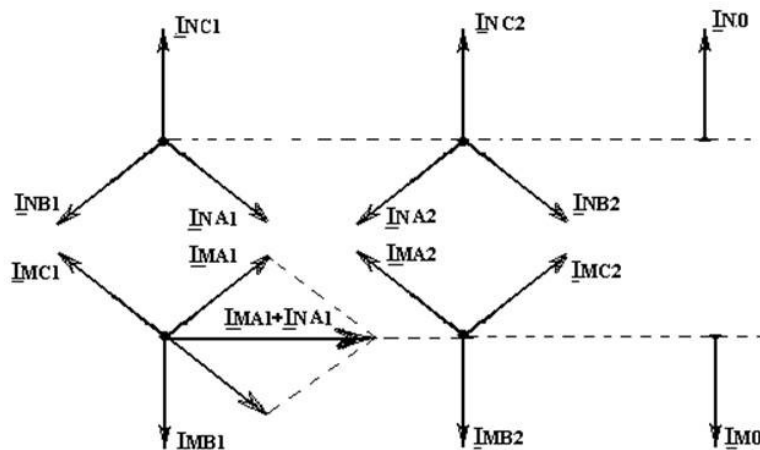
ИЛИ

$$a \cdot Un'a1 + a^2 \cdot Un'a2 + Un'0 = 3Rdn \cdot a \cdot Ina1 \quad (10)$$

Из выражения (1) в соответствии с (9), (10), (12) и (13) получаем, что:

$$Ima1 = -a \cdot Imal \quad (11)$$

Это равенство показывает, что симметричные составляющие токов, в точках N и M при ДЗНЗ, не являются независимыми переменными, а жестко взаимосвязаны между собой, что наглядно отображается векторными диаграммами (см. рисунок 2).



**Рисунок 2 – Симметричные составляющие токов в местах ДЗНЗ**

В соответствии с теорией симметричных составляющих в месте несимметрии возникают напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности. При этом источник формирует только ЭДС прямой последовательности, в месте размещения источника напряжение обратной последовательности принимает нулевое значение. Таким образом, составленные элементарные схемы отдельных последовательностей для фазы А будут выглядеть следующим образом (см. рисунок 3).

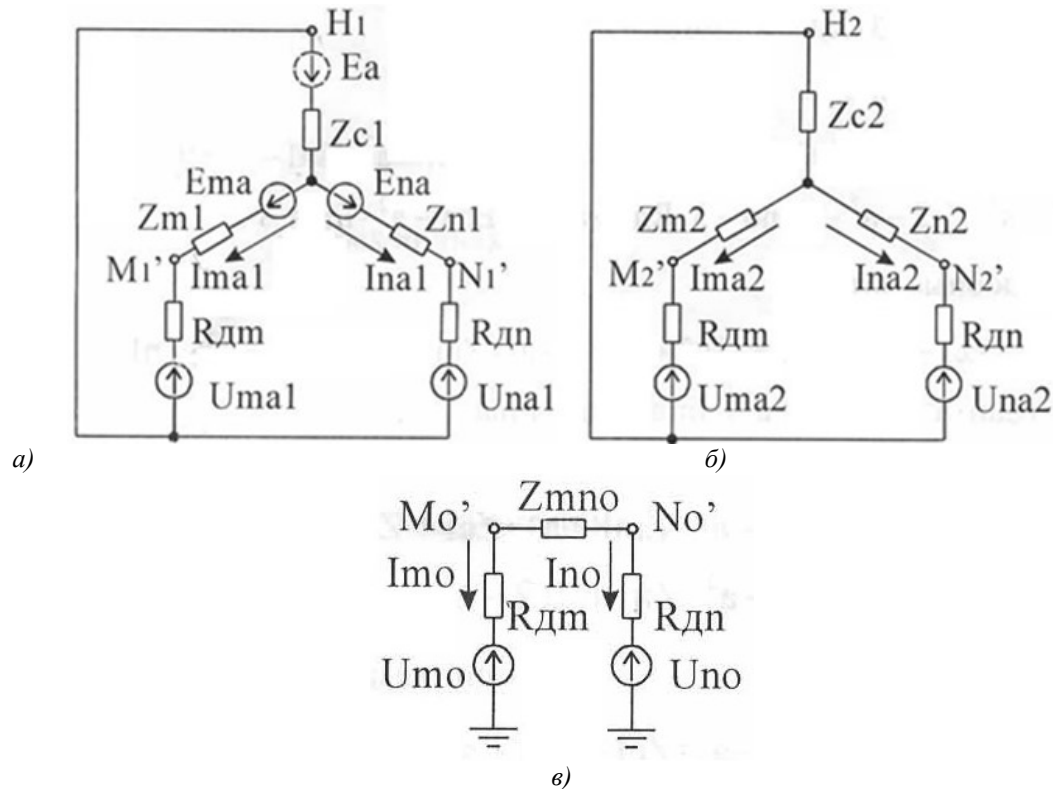


Рисунок 3 – Элементарные схемы замещения отдельных последовательностей для рассматриваемого случая: а) прямой последовательности; б) обратной последовательности; в) нулевой последовательности

По методу контурных токов из схемы замещения прямой последовательности

$$E_a = (I_{m1} + I_{n1})Z_{c1} + I_{m1}(R_{dm} + Z_{m1}) - U_{a1}$$

$$E_a = (I_{m1} + I_{n1})Z_{c1} + I_{n1}(R_{dn} + Z_{n1}) - U_{n1}$$

Из этих уравнений зависимости между токами и напряжениями прямой, обратной и нулевой последовательности в точках М'' и N'' будут иметь вид:

$$U_{m'1} = E_{a1} - I_{m1} \cdot (Z_{m1} + Z_{c1}) - I_{n1} \cdot Z_{c1} \quad (12)$$

$$U_{n'1} = E_{n1} - I_{m1} \cdot Z_{c1} - I_{n1} \cdot (Z_{n1} + Z_{c1}) \quad (13)$$

$$U_{m'a2} = -I_{m2} \cdot (Z_{m2} + Z_{c2}) - I_{n2} \cdot Z_{c2} \quad (14)$$

$$U_{n'a2} = -I_{m2} \cdot Z_{c2} - I_{n2} \cdot (Z_{n2} + Z_{c2}) \quad (15)$$

$$U_{n'0} - U_{m'0} = I_{m0} \cdot Z_{m0} \quad (16)$$

Для определения величины тока замыкания на землю необходимо решить систему из 12 уравнений (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20).

Для её решения произведем замену всех неизвестных в уравнениях (14), (16), (17), (18), (19), (20) через ток  $I_{m1}$ , тогда получим следующие выражения:

$$U_{m'a1} = E_{a1} - I_{m1} \cdot (Z_{m1} + Z_{c1}) + a \cdot I_{n1} \cdot Z_{c1} \quad (17)$$

$$U_{n'a1} = E_{n1} - I_{m1} \cdot Z_{c1} + a \cdot I_{n1} \cdot (Z_{n1} + Z_{c1}) \quad (18)$$

$$U_{m'a2} = -a \cdot I_{m1} \cdot (Z_{m2} + Z_{c2}) + a^2 \cdot I_{n1} \cdot Z_{c2} \quad (19)$$

$$U_{n'a2} = -a \cdot I_{m1} \cdot Z_{c2} + a^3 \cdot I_{n1} \cdot (Z_{n2} + Z_{c2}) \quad (20)$$

$$U_{m'0} = U_{n'0} - a^2 \cdot I_{m1} \cdot Z_{m0} \quad (21)$$

$$Un'0 = 3 \cdot Rdn \cdot a \cdot Im a1 - a \cdot Un'a1 - a^2 \cdot Un'a2 = -3 \cdot a^2 \cdot Im a1 \cdot Rdn - a \cdot (Ena - Im a1 \cdot Zc1 + (22) \\ + a \cdot Im a1 \cdot (Zn1 + Zc1)) - a^2 \cdot (-a \cdot Im a1 \cdot Zc2 + a \cdot a^2 \cdot Im a1 \cdot (Zn2 + Zc2))$$

Произведя подстановку уравнений (21), (22), (23), (24), (25) и (26) в уравнение (11) получаем следующее уравнение:

$$-a^2 \cdot Im a1 \cdot Zm1 - a^2 \cdot Im a1 \cdot Zc1 + Im a1 \cdot Zc1 - a^2 \cdot Im a1 \cdot Zm2 - a^2 \cdot Im a1 \cdot Zc2 + a^4 \cdot Im a1 \cdot Zc2 - \\ - 3 \cdot Rdn \cdot a^2 \cdot Im a1 + a \cdot Im a1 \cdot Zc1 - a^2 \cdot Im a1 \cdot Zn1 - a^2 \cdot Uma1 \cdot Zc1 + Uma1 \cdot Zc2 - a^5 \cdot Im a1 \cdot Zn2 - \\ - a^5 \cdot Im a1 \cdot Zc2 - Im a1 \cdot a^2 \cdot Zmn0 - 3 \cdot Rdm \cdot a^2 \cdot Im a1 = a \cdot Ena - a^2 \cdot Ema$$

Выносим ток  $Im a1$  за скобки, на основании чего получаем уравнение:

$$(-a^2 \cdot Zm1 - a^2 \cdot Zc1 + Zc1 - a^2 \cdot Zm2 - a^2 \cdot Zc2 + a^4 \cdot Zc2 - 3 \cdot Rdn \cdot a^2 + a \cdot Zc1 - a^2 \cdot Zn1 - \\ - a^2 \cdot Zn1 + Zc2 - a^5 \cdot Zn2 - a^5 \cdot Zc2 - a^2 \cdot Zmn0 - 3 \cdot Rdm \cdot a^2) \cdot Im a1 = a \cdot Ena - a^2 \cdot Ema$$

Объединяем подобные члены, на основании чего получаем уравнение:

$$(-a^2 \cdot Zc1 + Zc1 + a \cdot Zc1 - a^2 \cdot Zc1 - a^2 \cdot Zc2 + a \cdot Zc2 + Zc2 - a^2 \cdot Zc2 - a^2 \cdot Zm1 - a^2 \cdot Zm2 \\ - a^2 \cdot Zn1 - a^2 \cdot Zn2 - a^2 \cdot Zmn0 - 3 \cdot Rdm \cdot a^2 - 3 \cdot Rdn \cdot a^2) \cdot Im a1 = a \cdot Ena - a^2 \cdot Ema$$

Выносим подобные члены за скобки, на основании чего получаем уравнение:

$$((-a^2 + 1 + a - a^2) \cdot Zc1 + (-a^2 + a + 1 - a^2) \cdot Zc2 - a^2 \cdot Zm1 - a^2 \cdot Zm2 - a^2 \cdot Zn1 \\ - a^2 \cdot Zn2 - a^2 \cdot Zmn0 - 3 \cdot Rdm \cdot a^2 - 3 \cdot Rdn \cdot a^2) \cdot Im a1 = a \cdot Ena - a^2 \cdot Ema \\ - 3 \cdot a^2 \cdot Zc1 - 3 \cdot a^2 \cdot Zc2 - a^2 \cdot Zm1 - a^2 \cdot Zm2 - a^2 \cdot Zn1 - a^2 \cdot Zn2 - a^2 \cdot Zmn0 - \\ - 3 \cdot Rdm \cdot a^2 - 3 \cdot Rdn \cdot a^2) \cdot Im a1 = a \cdot Ena - a^2 \cdot Ema$$

После всех преобразований ток прямой последовательности определяем по формуле:

$$Im a1 = \frac{a^2 \cdot Ena - a^2 \cdot Ema}{(3 \cdot Zc1 + 3 \cdot Zc2 + Zm1 + Zm2 + Zn1 + Zn2 + Zmn0 + 3 \cdot Rdn + 3 \cdot Rdn) \cdot (-a^2)} \quad (23)$$

После деления на  $-a^2$ , получаем значение тока прямой последовательности

$$Im a1 = \frac{Ema - a^2 \cdot Ena}{3 \cdot Zc1 + 3 \cdot Zc2 + Zm1 + Zm2 + Zn1 + Zn2 + Zmn0 + 3 \cdot Rdn + 3 \cdot Rdn} \quad (24)$$

Когда замыкание на землю происходит на разных ответвлениях, то сопротивление нулевой последовательности следует представить в виде двух сопротивлений (см. рисунок 4), тогда формула тока прямой последовательности имеет вид (29).

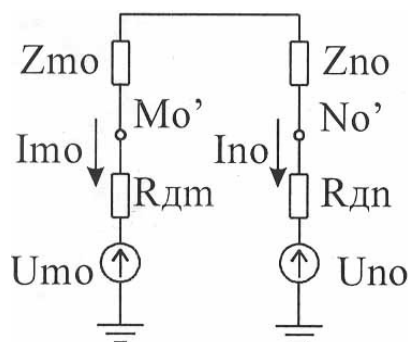


Рисунок 4 – Схема замещения нулевой последовательности при искусственном ДЗНЗ в ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью

$$Im a1 = \frac{Ema - a^2 \cdot Ena}{3 \cdot Zc1 + 3 \cdot Zc2 + Zm1 + Zm2 + Zn1 + Zn2 + Zm0 + Zn0 + 3 \cdot Rdm + 3 \cdot Rdn} \quad (25)$$

На основании выражения тока прямой последовательности, записываем выражения для определения тока обратной и нулевой последовательности:

$$Ima2 = \frac{Ena - a^2 \cdot Ema}{3 \cdot Zc1 + 3 \cdot Zc2 + Zm1 + Zm2 + Zn1 + Zn2 + Zm0 + Zn0 + 3 \cdot Rdm + 3 \cdot Rdn} \quad (26)$$

$$Ima0 = \frac{0}{3 \cdot Zc1 + 3 \cdot Zc2 + Zm1 + Zm2 + Zn1 + Zn2 + Zm0 + Zn0 + 3 \cdot Rdm + 3 \cdot Rdn} \quad (27)$$

$$Imb = \frac{\sqrt{3} \cdot Ea}{\sqrt{(Rm + Rn + Rdm + Rdn)^2 + (Xm + Xn)^2}} = -Inc, \quad (28)$$

где  $I_{mb} = -I_{nc}$  ток искусственного ДЗНЗ, фиксируемый трансформаторами тока (рисунок 1) в виде кратковременного броска соответственно в фазах С и В, замыкающих на землю, А;

$R_m$  – активное сопротивление участка ВЛЭП 10 кВ до точки М, Ом;

$R_n$  – активное сопротивление участка ВЛЭП 10 кВ до точки N, Ом;

$X_m$  – реактивное сопротивление участка ВЛЭП 10 кВ до точки М, Ом;

$X_n$  – реактивное сопротивление участка ВЛЭП 10 кВ до точки, Ом;

$R_{dm}$  – переходное сопротивление в месте контакта точки М с землей на ВЛЭП 10 кВ,

Ом;

$R_{dn}$  – переходное сопротивление в месте контакта точки N с землей на ВЛЭП 10 кВ, Ом;

При расчете тока искусственного ДЗНЗ используем следующую информацию:

1. Значения активного и реактивного сопротивления сталеалюминевых проводов АС-35, АС-50 и АС-70 для ВЛЭП 10 кВ разных конструкций, представлены в таблице 1 [9].

Таблица 1 – Активное и реактивное сопротивление сталеалюминевых проводов

Марка	Активное сопротивление Ом/км	Реактивное сопротивление Ом/км, прим среднем геометрическом расстоянии между проводами, мм				
		1000	2000	3000	4000	5000
АС35	0,9	0,37	0,4	0,43	0,44	-
АС50	0,65	0,35	0,39	0,42	0,43	-
АС70	0,46	0,34	0,38	0,41	0,42	0,44

2. При обрыве провода ВЛЭП 10 кВ и замыкании его на поверхностный слой земли ориентировочно принимаем следующие значения переходных сопротивлений [10]: 10 кОм (щебень), 6 кОм (песок), 3 кОм (сухая земля), 1 кОм (асфальт), 100 Ом (сырая земля).

3. При повреждении штыревых изоляторов ШФ10, ШС 10 их сопротивление изменяется в диапазоне от 300 до 10 кОм [11].

4. Нормативная величина переходного сопротивления заземляющего устройства для железобетонных стоек в ВЛЭП 10 кВ согласно ПУЭ должна быть не более 4 Ом [12].

### Заключение

Использование теории симметричных составляющих определяет достоверность результатов расчета тока искусственного ДЗНЗ, искусственно создаваемого устройством РЗиА в ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью для выявления, устранения, а также предотвращения аварийных ситуаций, связанных с возникновением замыканий на землю.

И хотя предлагаемая методика не учитывает реактивную составляющую переходного сопротивления грунта, это практически не снижает точности расчета, что обеспечивает возможность применения данной методики в профессиональной деятельности специалистов, ответственных за проектирование, разработку, настройку и обслуживание систем РЗиА.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2273938 Российская Федерация, МПК Н 02 J 13/00. Способ определения линии с замыканием на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью / Васильев В.Г., Чернышов В.А.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный аграрный университет. - №204131321/09; заявл. 26.10.2004; опубл. 10.04.2006. Бюл. № 10. – 4 с.

2. Пат. 2294585 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/16. Способ определения линии с замыканием на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью / Васильев В.Г., Чернышов В.А.; заявитель и

патентообладатель Орловский государственный аграрный университет. - № 205133565/0,9; заявл. 31.10.2005; опубл. 27.02.2007. Бюл. № 6. – 4 с.

3. Пат. 2304334 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/16. Способ защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю / Васильев В.Г., Чернышов В.А.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный аграрный университет. - № 2006114235/0,9; заявл. 25.04.2006; опубл. 10.08.2007. Бюл. № 22. – 4 с.

4. Пат. 2328800 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/16. Способ дистанционного отключения участка линии с замыканием на землю и его идентификации в распределительных сетях с изолированной нейтралью / Чернышов В.А., Гавриченко А.И.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный аграрный университет. - № 2007119853/0,9; заявл. 28.05.2007; опубл. 10.07.2008. Бюл. № 19. – 4 с.

5. Пат. 2798464 Российская Федерация, МПК Н02Н 3/16. Способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью / Качанов А.Н., Чернышов В.А., Даровых А.С., Лукьянов Г.В.; заявитель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.Тургенева»; заявл. 20.12.2022; опубл. 23.06.2023. Бюл. № 18. – 10 с.

6. Пат. 2809770 Российская Федерация, МПК Н02Н 9/08. Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью / Качанов А.Н., Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С.; заявитель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.Тургенева»; заявл. 20.12.2022; опубл. 18.12.2023. Бюл. № 35. – 10 с.

7. Аксютин, В. А. Специальные методы расчета трехфазных сетей. Метод симметричных составляющих: учеб. пособие / В. А. Аксютин. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. - 78 с.

8. Кучумов, Л.А. Переходное сопротивление в месте ОЗЗ. Влияние на режимные параметры и рабочие сигналы защит от ОЗЗ / Л.А. Кучумов, А.А. Кузнецов, Д.П. Червочков // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 4(106). – С. 24-27.

9. Будзко, И.А. и др. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.: ил. – (Учебники и учебные пособия для студентов высш. учеб. заведений)

10. Булычев, А. В. Выбор параметров срабатывания защит от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях при разных режимах нейтрали / А. В. Булычев // Релейная защита и автоматизация. – 2022. – № 1(46). – С. 36-45

11. Несенюк, Т. А. Методика определения состояния изоляторов ВЛ 6 - 10 кВ / Т.А. Несенюк, Б.С. Сергеев, А.П. Сухогузов // Известия Транссиба. - Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2014, №4 (20). – С.97-104

12. Правила устройства электроустановок (ПУЭ 7). 7-е издание. Утв. Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204). Дата введения 1 января 2003 г.

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

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

**Астафьев Никита Алексеевич**  
ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С.  
Тургенева", г. Орел,  
магистрант 1 курса, направления  
подготовки 13.04.02  
«Электроэнергетика и  
электротехника»  
302020 г. Орел, Наугорское шоссе, д.  
29  
Тел. 8(4862)-41-98-30  
E-mail: astafiev.nikita@yandex.ru

CHERNYSHOV V.A., KOROLEVA T.G., ASTAFIEV N.A.

## METHOD FOR CALCULATING CURRENT OF ARTIFICIAL DOUBLE GROUND FAULT IN OVERHEAD ELECTRICAL NETWORKS 10 kV WITH AN ISOLATED NEUTRAL

**Abstract.** *The necessity of developing mathematical support for the circuit design solutions developed by the authors based on the formation of an artificial double earth fault, providing prompt detection, disconnection or galvanic separation of 10 kV overhead power lines with insulation damage, as well as the transfer of developing double earth faults into single-phase ones, is substantiated. A method for calculating the current of an artificial double earth fault based on the use of the theory of symmetric components is considered.*

**Keywords:** *10 kV overhead electric network with an isolated neutral; single-phase insulation damage; asymmetric operation mode, artificial double earth fault, method of symmetrical components, substitution circuit, forward, reverse and zero sequence currents.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Patent. 2273938 Russian Federation, IPC H 02 J 13/00. Method for determining a line with a ground fault in distribution networks with an isolated neutral / Vasiliev V.G., Chernyshov V.A.; applicant and patent holder Oryol State Agrarian University. - No. 204131321/09; declared 26.10.2004; published 10.04.2006. Bulletin No. 10. – 4 p.
2. Patent. 2294585 Russian Federation, IPC H 02 H 3/16. Method for determining a line with a ground fault in electrical networks with an isolated neutral / Vasiliev V.G., Chernyshov V.A.; applicant and patent holder Oryol State Agrarian University. - No. 205133565/0.9; declared 31.10.2005; published 27.02.2007. Bulletin No. 6. – 4 p.
3. Patent. 2304334 Russian Federation, IPC H 02 H 3/16. Method for protecting a three-phase network with an isolated neutral from single-phase earth faults / Vasiliev V.G., Chernyshov V.A.; applicant and patent holder Oryol State Agrarian University. - No. 2006114235/0.9; declared 25.04.2006; published 10.08.2007. Bulletin No. 22. – 4 p.
4. Patent. 2328800 Russian Federation, IPC H 02 H 3/16. Method for remote disconnection of a line section with a ground fault and its identification in distribution networks with an isolated neutral / Chernyshov V.A., Gavrichenko A.I.; applicant and patent holder Oryol State Agrarian University. - No. 2007119853/0.9; declared 28.05.2007; published 10.07.2008. Bulletin No. 19. – 4 p.
5. Patent. 2798464 Russian Federation, IPC H02H 3/16. Method for automatic elimination of overvoltage during a single-phase ground fault in an electrical network with an isolated neutral / Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Darovykh A.S., Lukyanov G.V.; applicant FSBEI HE "Odessa State University named after I.S. Turgenev"; declared 20.12.2022; published 23.06.2023. Bulletin No. 18. – 10 p.
6. Patent. 2809770 Russian Federation, IPC H02H 9/08. Method for converting a distributed double fault to ground into a single-phase fault in networks with an isolated neutral / Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Darovykh A.S.; applicant FSBEI HE "Odessa State University named after I.S. Turgenev"; declared 20.12.2022; published 18.12.2023. Bulletin No. 35. – 10 p.
7. Aksyutin, V. A. Special methods for calculating three-phase networks. Method of symmetrical components: textbook / V. A. Aksyutin. - Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2023. - 78 p.
8. Kuchumov, L. A. Transient resistance at the point of the main fault. Influence on the operating parameters and operating signals of protection against main fault / L. A. Kuchumov, A. A. Kuznetsov, D. P. Chervochkov // News of Electrical Engineering. - 2017. - No. 4 (106). - P. 24-27.
9. Budzko, I. A. et al. Power supply of agriculture / I. A. Budzko, T. B. Leshchinskaya, V. I. Sukmanov. - M.: Kolos, 2000. – 536 p.: ill. – (Textbooks and teaching aids for students of higher educational institutions)
10. Bulychev, A. V. Selection of parameters for tripping protection against single-phase earth faults in distribution networks under different neutral modes / A. V. Bulychev // Relay protection and automation. – 2022. – No. 1 (46). – P. 36-45
11. Nesenyuk, T. A. Methodology for determining the state of 6-10 kV overhead line insulators / T. A. Nesenyuk, B. S. Sergeev, A. P. Sukhoguzov // Transsib News. - Omsk: Omsk State University of Railway Engineering, 2014, No. 4 (20). – P. 97-104
12. Electrical Installation Rules (PUE 7). 7th edition. Approved. Ministry of Energy of the Russian Federation of July 8, 2002 No. 204). Date of introduction: January 1, 2003.

**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

**Koroleva Tatyana Gennadiyevna**  
 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

**Astafiev Nikita Alekseevich**  
 FGBOU VO "OSU named after I.S. Turgenev", Orel,  
 1st 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: astafiev.nikita@yandex.ru

© В.А. Чернышов, Т.Г. Королева, Н.С. Астафьев, 2025

САЛИХОВ Р.Р., РАХМАНКУЛОВ Ш.Ф., ГАРИФУЛЛИН М.Ш., ВОРКУНОВ О.В.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРОЛЛЕЙНЫХ ШИНОПРОВОДОВ

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено моделирование тепловых режимов троллейных шинопроводов, используемых для электроснабжения цехового оборудования. Имитационное моделирование осуществлялось в программном комплексе Comsol. Верификация тепловой модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с лабораторными испытаниями. Разработанная модель позволяет моделировать режим работы шинопроводов при различных температурах окружающей среды и токовых нагрузках. Приведены результаты распределения температуры в объеме медного и стального шинопровода, а также в защитной оболочке из ПВХ материала при температурах окружающей среды 20°C и 30°C. Методика расчета параметров шинопровода включала в себя определение активного и реактивного сопротивления с учетом результатов температурного моделирования. На основе вычисленных данных для разных материалов (медь, сталь) проведен расчет потерь напряжения при различных коэффициентах мощности нагрузки. Разработанная методика расчета является основой для дальнейшего создания автоматизированных систем проектирования шинопроводов, учитывающих различные условия эксплуатации и используемый токопроводящий материал.

**Ключевые слова:** троллейный шинопровод, моделирование температурных режимов, сопротивление, потери напряжения.

### Введение

Троллейные шинопроводы находят широкое применение в системах цехового электроснабжения благодаря своей способности обеспечивать подвижное электропитание различных устройств, таких как кран-балок, мостовых кранов, тельферов и другого подвижного оборудования [1]. Корпус шинопровода изготавливается из пластика, внутри которого расположены шины, в которых вставляется тележка-токосъёмник [2]. Несмотря на кажущуюся простоту конструкции при проектировании троллейных шинопроводов возникает ряд проблем, связанных с точным расчетом тепловых и электрических параметров, особенно в условиях российской нормативной базы. Данная задача осложняется тем, что в последнее время появилось достаточно много нестандартных форм троллейных шинопроводов разных конструкций, однако полноценных методик их расчета и проектирования в отечественном сегменте просто не существует. Использовать же методики расчета шинопроводов стандартных форм и сечений для нужд электроснабжения, описанных в литературе [3, 4], в данном случае не представляется корректным. В условиях отсутствия унифицированных межгосударственных стандартов и ограничения применения зарубежных методик возникает необходимость разработки инженерных расчетов, с учетом влияния максимально возможного числа факторов, а также адаптированных под российские нормативы.

Основной целью данной работы является разработка методики расчета тепловых и электрических режимов троллейных шинопроводов с учетом материалов шины (медь, алюминий, сталь) и температуры окружающей среды. Проведение таких расчетов позволит на этапе проектирования прогнозировать поведение шинопроводов в различных условиях эксплуатации без проведения натурных испытаний.

В рамках данной работы не будет учитываться поверхностный эффект (скин-эффект), а также влияние взаимных индуктивностей на распределение тока по сечению шинопроводов.

### Основная часть

Конструктивной особенностью троллейных шинопроводов является обязательное наличие изоляционной оболочки из поливинилхлоридного пластика (ПВХ), которая необходима для исключения перекрытия и междофазного замыкания подвижной частью токосъёмника. Допустимые температуры нагрева проводников с изоляцией приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 – Допустимые температуры нагрева токопроводящих жил кабелей

Материал изоляции кабелей	Допустимая температура нагрева жил кабеля, °С			
	Длительно допустимая	В режиме перегрузки	Предельная при коротком замыкании	По условию невозгорания при коротком замыкании
Поливинилхлоридный пластикат	70	90	60/140	350
Поливинилхлоридный пластикат пониженной пожароопасности				

Согласно ПУЭ температура нагрева шин при КЗ должна быть не выше следующих предельно допустимых значений:

медные – 300 °С;

стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппаратами – 400 °С;

стальные с непосредственным присоединением к аппаратам – 300 °С.

Согласно п. 3.2. ГОСТ 26346-84 «Шинопроводы осветительные напряжением до 660 В переменного тока. Общие технические условия» для шин из меди, стали и его сплавов без защитных покрытий рабочих поверхностей не должна превышать 95 °С [6]. Соответственно именно на это значение и нужно ориентироваться при проектировании.

В качестве объектов для проектирования были взяты параметры шинопроводов производства «E-LINEURC», представленных на рисунке 1 и в таблице 2 [7].

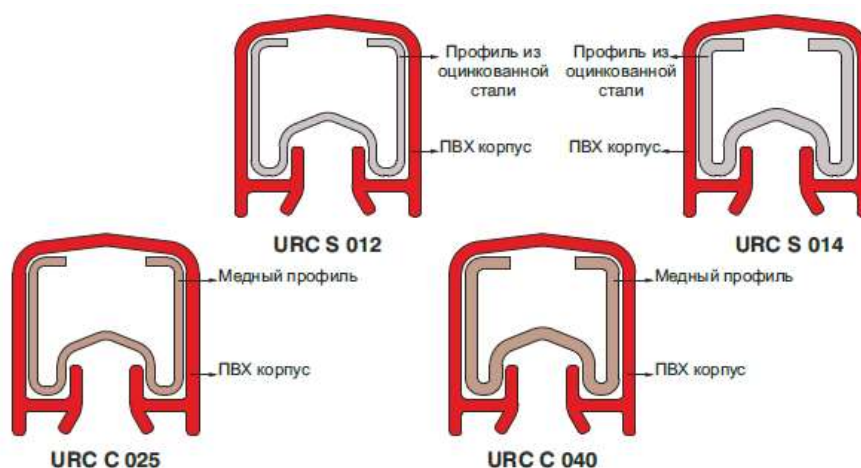


Рисунок 1 – Сечение шинопроводов марки «E-LINEURC»

Таблица 2 – Допустимые температуры нагрева токопроводящих жил для «E-LINEURC»

Тип шинопровода	Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	Вес, кг/м	Ток, А
URC S 012	64	0,50	120
URC S 014	96	0,76	140
URC S 025	64	0,57	250
URC S 040	96	0,86	400

Методика расчета параметров шинопровода начинается с определения активного сопротивления согласно известной формуле:

$$r_t = \rho_0 \cdot \frac{l}{S} \cdot [1 + \alpha(t - t_0)],$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления с повышением температуры;  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $t_0 = 20$  °С (значения приведены в таблице 3);  $S$  – сечение

проводника, мм<sup>2</sup>;  $l$  – длина проводника, м.

Таблица 3 – Основные характеристики металлов и сплавов

Металл	Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°C
Медь	0,017 – 0,018	0,004
Сталь	0,103 – 0,137	0,0057 – 0,0060

На практике указанная выше температура не может быть постоянно одинаковой, а ее изменение отразится на изменении удельного сопротивления  $\rho_0$ , что в конечном итоге скажется на изменении активного сопротивления. Точное вычисление удельного сопротивления было выполнено с помощью средств имитационного моделирования, с помощью созданной тепловой модели, имитирующей работу шинопровода в реальных условиях эксплуатации. С ее помощью появляется возможность определить температуры нагрева шинопровода, а также защитной оболочки ПВХ шинопровода. На основании нее производится вычисление электрических параметров – сопротивление, падение напряжения. Помимо этого, результаты теплового моделирования могут использоваться и для механических расчетов шинопроводов.

Моделирование теплового режима базируется на дифференциальных уравнениях, описывающих тепловой баланс в стационарном режиме. При этом создаются 3D модели шинопровода, задаются источники нагрева и способы теплообмена, а также граничные условия задачи. Расчет может осуществляться в различных программных комплексах, таких как PHOENICS, ANSYS, COMSOL, SimFlow и пр. При проектировании троллейных шинопроводов для цехового электроснабжения важно учитывать точные тепловые и электрические расчеты. Зарубежные исследования предоставляют ценные методики и рекомендации, которые могут быть адаптированы к российским нормативам. Исследование, представленное в статье [8], посвящено тепловому анализу различных конфигураций соединений шинопроводов. Авторы демонстрируют, как введение прорезей в контактной области может снизить температуру, используя метод конечных элементов (FEM). В работе [9] описывается подход к оптимизации тепловых характеристик электрических шинопроводов с использованием метода Тагучи и компьютерного моделирования. Это исследование подчеркивает важность учета тепловых факторов при проектировании и оптимизации конструкции шинопроводов.

В данной работе использован программный комплекс Comsol (академическая версия). Моделирование образцов осуществлялось при температурах окружающей среды 20 и 30 °C допустимые на производстве по СанПиН 1.2.3685-21. В основе созданной тепловой модели происходит решение ряда дифференциальных уравнений.

Тепловая модель позволяет определить допустимость работы шинопроводов с заданными значениями тока. Следующим этапом является проверка уровня напряжения в конце шинопровода при тех же максимальных значениях тока. Расчеты будем проводить для длины шинопровода  $L = 100$  м. При этом потребуются знание величины индуктивных сопротивлений шинопроводов, которые зависят от их конфигурации. В достаточном для проводимых расчетов приближении форму шинопроводов в сечении можно считать квадратной. Индуктивное сопротивление прямой последовательности фазы шинопровода  $x_1$  в миллиомах на метр рассчитывается по формуле [10]:

$$x_1 = 0,145 \cdot \lg \frac{d}{g_0},$$

где  $d$  - расстояние между центрами шин (рисунок 2), м;  
 $g_0$  - среднее геометрическое расстояние, м.

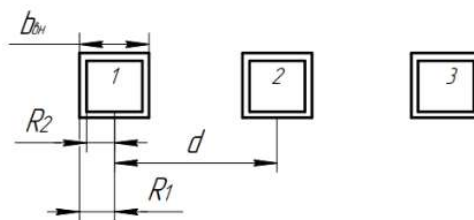


Рисунок 2 – Расстояние между шинами

Для расчетов первого приближения приводим размеры в виде трубчатой шины квадратичного сечения:

$$g_0 = 0,58Cb_{\text{вн}}$$

где  $b_{\text{вн}}$  – размер наружной (внешней) стороны квадратного сечения, м;  $C$  – коэффициент, значения которого должны соответствовать приведенным в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициента  $C$ 

Отношение внутренней и внешней сторон трубы квадратного сечения	Значение коэффициента $C$
0	0,7788
0,1	0,7825
0,2	0,793
0,3	0,8087
0,4	0,8286
0,5	0,8519
0,6	0,8778
0,7	0,9058
0,8	0,9358
0,9	0,9672
1	1

Вычисление отношения внутренней и внешней сторон трубы квадратного сечения вычисляется по формуле эквивалентного внешнего радиуса трубчатого сечения:

$$R_1 = \sqrt{a \cdot h}$$

где  $a$  – ширина шинопровода, м,  $h$  – высота шинопровода, м.

Эквивалентный внутренний радиус трубчатого сечения:

$$R_2 = \sqrt{a \cdot h - S_{\text{сеч.}}}$$

где  $a$  – ширина шинопровода, м;  $h$  – высота шинопровода, м;  $S_{\text{сеч.}}$  – сечение шинопровода, мм<sup>2</sup>. Исходя из полученного значения выбирается нужный коэффициент  $C$ , и рассчитывается реактивное сопротивление.

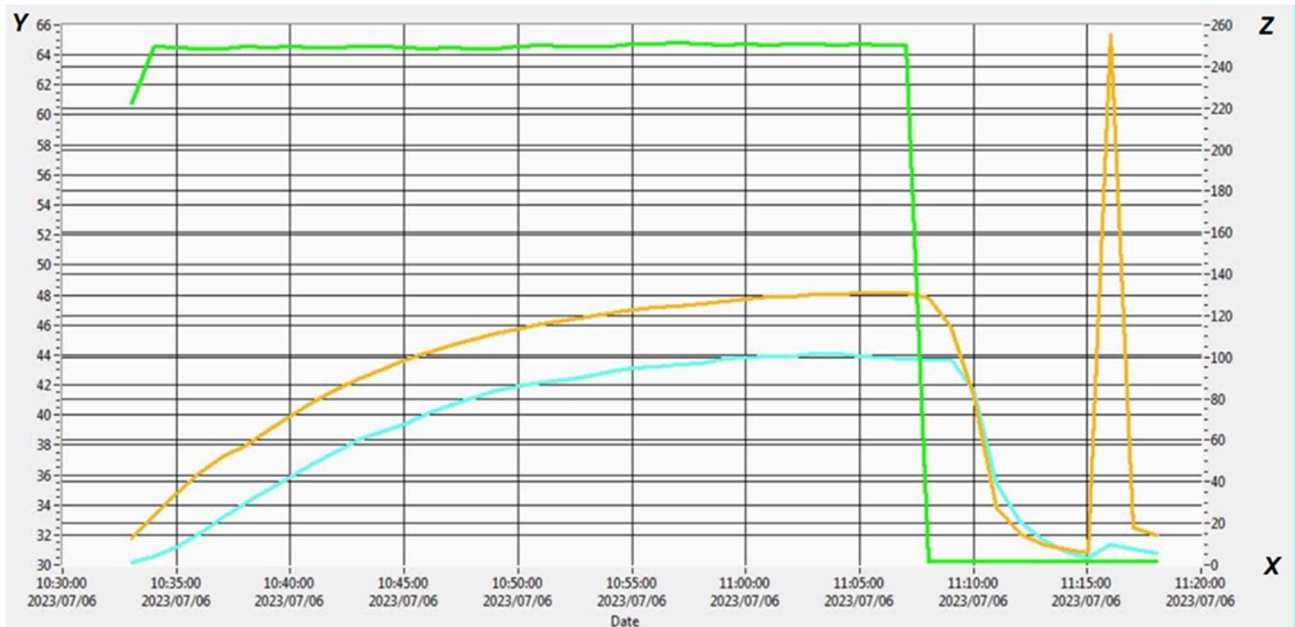
После определения активного и реактивного сопротивления, для учета теплового режима была создана имитационная модель шинопровода типа URC, изображённая на рисунке 1 в программном комплексе Comsol. Данная модель позволяет моделировать режим его работы при различных температурах окружающей среды и токовых нагрузках.

Адекватность разработанной тепловой модели была верифицирована путем сравнения с модельным экспериментом, проведенным в лабораторных условиях. Для эксперимента был использован медный троллейный шинопровод с площадью поперечного сечения 460 мм<sup>2</sup>, имевшийся в распоряжении авторов. В качестве изоляции использовалась оболочка из ПВХ материала. Температура окружающей среды составляла 32 °С; значение электрического тока – 250 А. Данные с термоэлектрического преобразователя представлены на рисунке 3. На рисунке по оси  $x$  представлено время и дата проведения эксперимента; по оси  $y$  – значение температуры, °С; оси  $z$  – значение электрического тока.

Как видно из графика при подаче электрического тока происходит постепенный нагрев

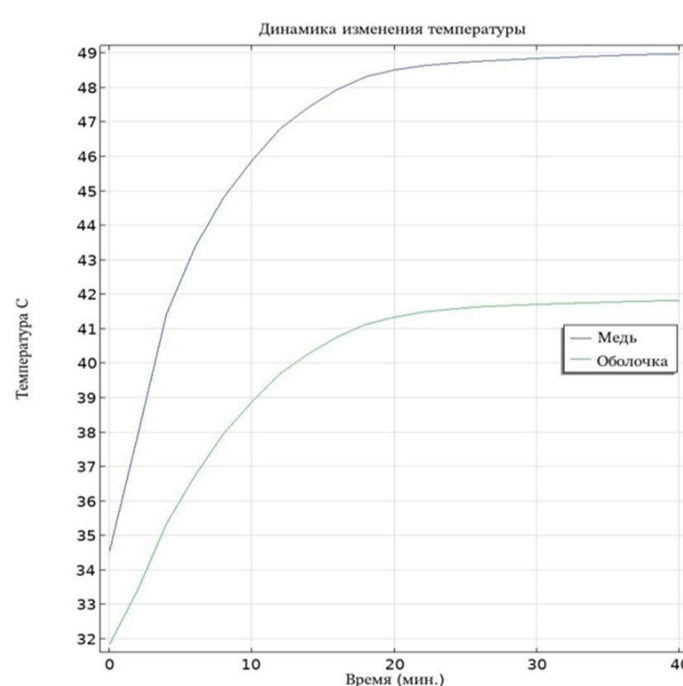
шинопровода и изолирующей ПВХ оболочки. Спустя 33 минуты после начала эксперимента рост температуры шинопровода прекращается и устанавливается ее постоянное значение равное  $48,1^{\circ}\text{C}$ . Температура изолирующей оболочки несколько ниже и достигает пикового значения около  $44^{\circ}\text{C}$ . Скачки на графике после проведения эксперимента вызваны отключением термоэлектрических преобразователей.

Результаты моделирования нахождения испытанного медного шинопровода в описанных выше условиях получены в программном комплексе COMSOL Multiphysics. На рисунке 4 представлены полученные графики изменения температур.



**Рисунок 3 – Динамика изменения температуры в шинопроводе и оболочке:**

Зеленая кривая – график изменение величины электрического тока (значения по оси Z);  
Оранжевая кривая – график изменения температуры на поверхности оболочки (значения по оси Z);  
Синяя кривая – график изменения температуры на поверхности шинопровода



**Рисунок 4 – Графики изменения температуры в медном шинопроводе и оболочке:**

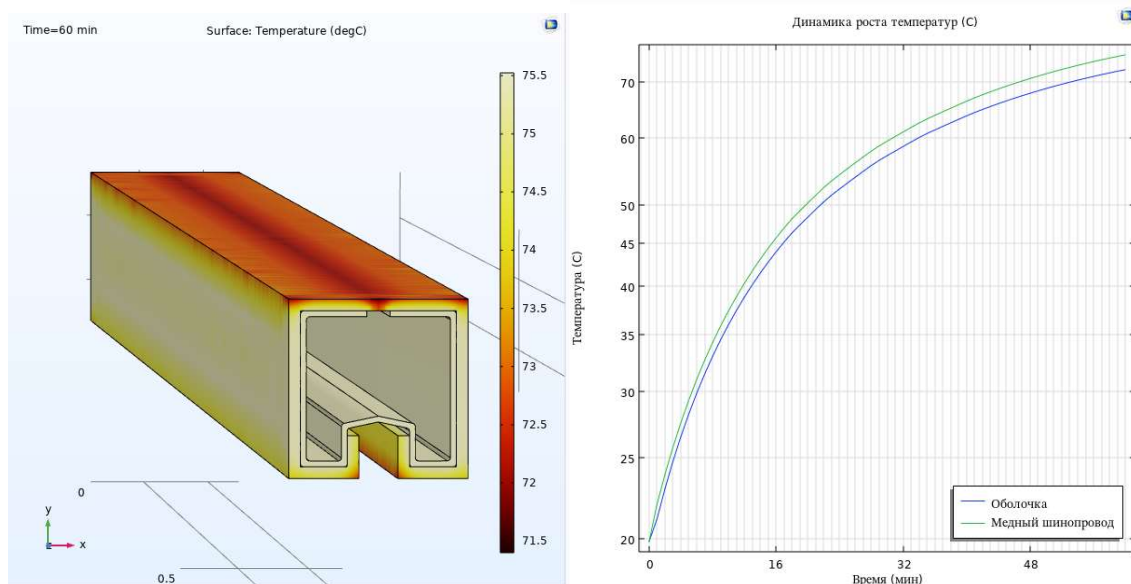
Зеленая кривая – температура оболочки;  
Синяя кривая – температура медного шинопровода

Сравнение экспериментальных данных (рисунок 3) и результатов моделирования (рисунок 4) позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели. Это позволяет использовать ее для моделирования и других шинопроводов. С помощью этой модели было проведено моделирование температурных режимов медных и стальных шинопроводов со стандартными сечениями 64 и 96 мм<sup>2</sup>, при температурах окружающей среды 20 и 30 °С.

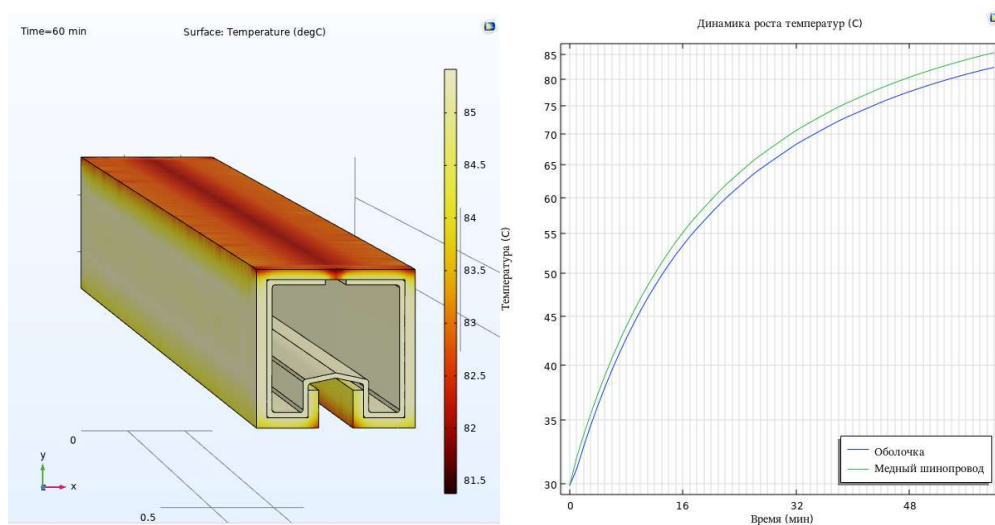
На рисунках 5.1; 5.2; 5.3; 5.4 представлено объемное распределения температур в медном шинопроводе, а также графики динамики изменения температуры в наиболее нагретых точках шинопровода и оболочки. Время динамики роста температуры было ограничено 1 часом. Полученные результаты сведены в таблицы 5.1 и 5.2.

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что температура нагрева оболочки не превышает допустимые значения для медного проводника сечением 64 мм<sup>2</sup>. Однако для проводника сечением 96 мм<sup>2</sup> температура оболочки и шинопровода превысило допустимые значения в обоих случаях.

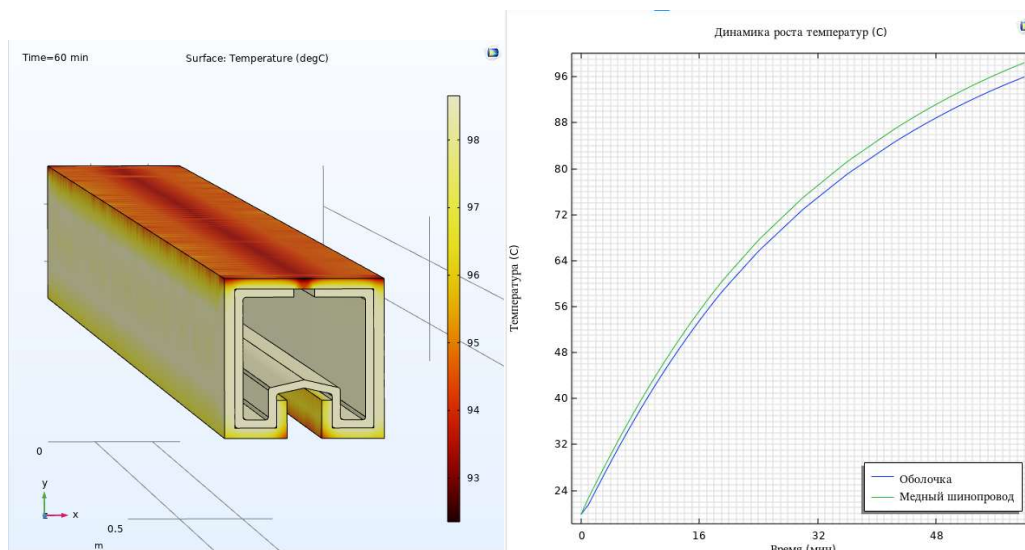
Также было проведено моделирование температурного режима для стального шинопровода с теми же стандартными сечениями 64 и 96 мм<sup>2</sup>. Результаты моделирования представлены на рисунках 6.1 ÷ 6.4. Полученные результаты сведем в таблицы 6.1 и 6.2.



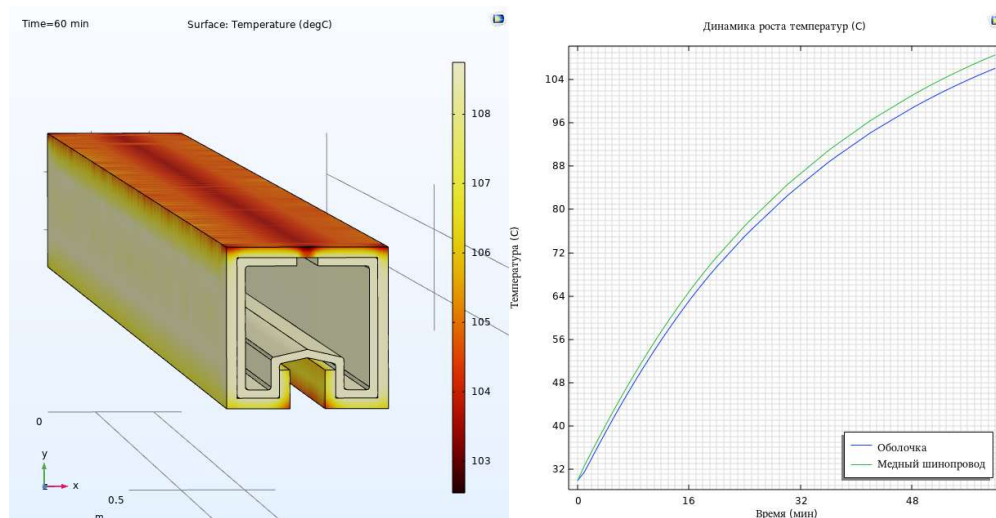
**Рисунок 5.1 – Диаграмма распределения и изменения температур медного шинопровода и оболочки Сечение 64 мм<sup>2</sup>, номинальный ток 250 А, температура окружающей среды 20 °С**



**Рисунок 5.2 – Диаграмма распределения и изменения температур медного шинопровода и оболочки Сечение 64 мм<sup>2</sup>, номинальный ток 250 А, температура окружающей среды 30 °С**



**Рисунок 5.3 – Диаграмма распределения и изменения температур медного шинопровода и оболочки**  
Сечение 96 мм<sup>2</sup>, номинальный ток 400 А, температура окружающей среды 20 °С



**Рисунок 5.4 – Диаграмма распределения и изменения температур медного шинопровода и оболочки**  
Сечение 96 мм<sup>2</sup>, номинальный ток 400 А, температура окружающей среды 20 °С

**Таблица 5.1 – Результаты моделирования для медного шинопровода**

Модель	Сечение, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток, А	Температура окружающей среды, °С	Допустимая температура нагрева оболочки, °С	Температура нагрева оболочки, °С	Допустимая температура нагрева шинопровода, °С	Температура нагрева шинопровода, °С
URC C 025	64	250	20	90	72	95	78
URC C 025	64	250	30	90	82	95	86

**Таблица 5.2 – Результаты моделирования для медного шинопровода**

Модель	Сечение, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток, А	Температура окружающей среды, °С	Допустимая температура нагрева оболочки, °С	Температура нагрева оболочки, °С	Допустимая температура нагрева шинопровода, °С	Температура нагрева шинопровода, °С
URC C 040	96	400	20	90	96	95	100
URC C 040	96	400	30	90	105	95	110

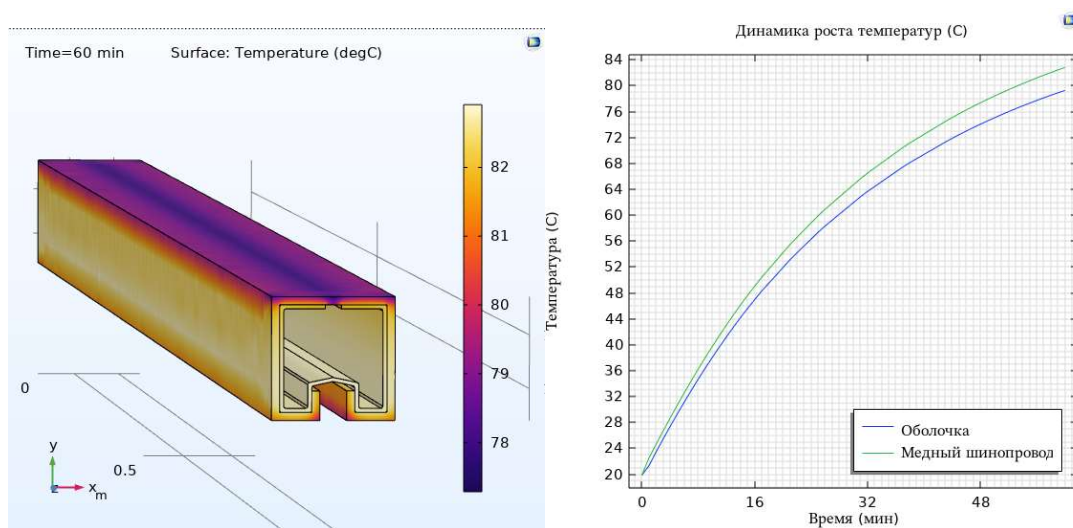


Рисунок 6.1 – Диаграмма распределения и изменения температур стального шинопровода и оболочки: Сечение  $64 \text{ мм}^2$ , номинальный ток  $120 \text{ А}$ , температура окружающей среды  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

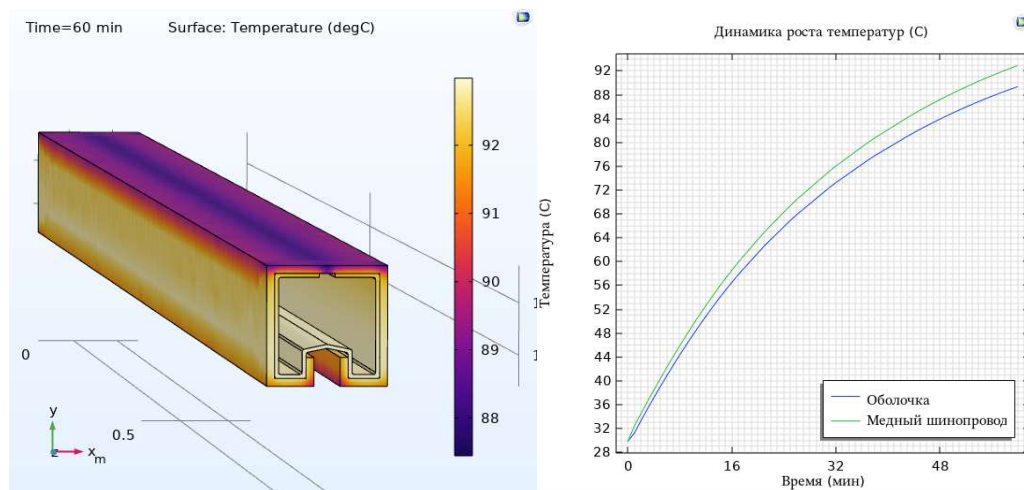


Рисунок 6.2 – Диаграмма распределения и изменения температур стального шинопровода и оболочки: Сечение  $64 \text{ мм}^2$ , номинальный ток  $120 \text{ А}$ , температура окружающей среды  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

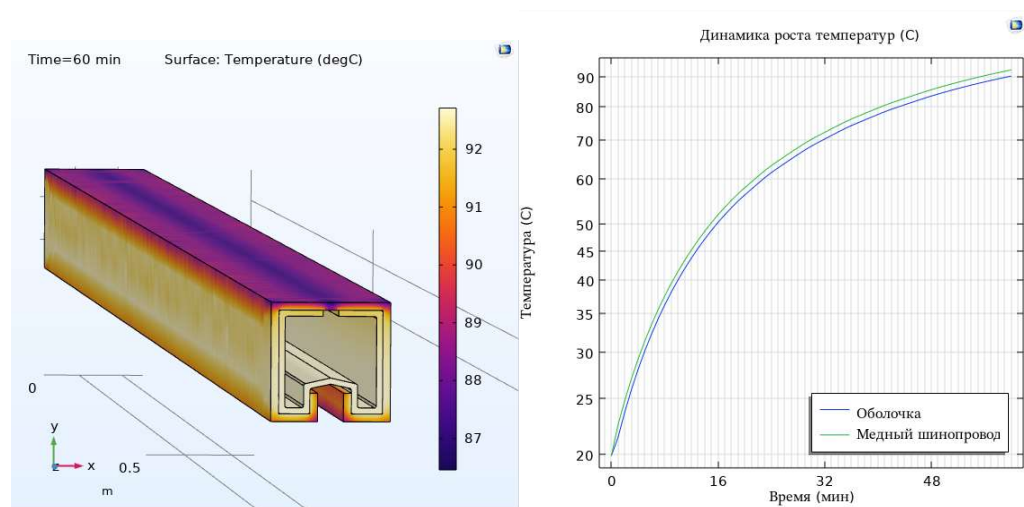


Рисунок 6.3 – Диаграмма распределения и изменения температур стального шинопровода и оболочки: Сечение  $96 \text{ мм}^2$ , номинальный ток  $140 \text{ А}$ , температура окружающей среды  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

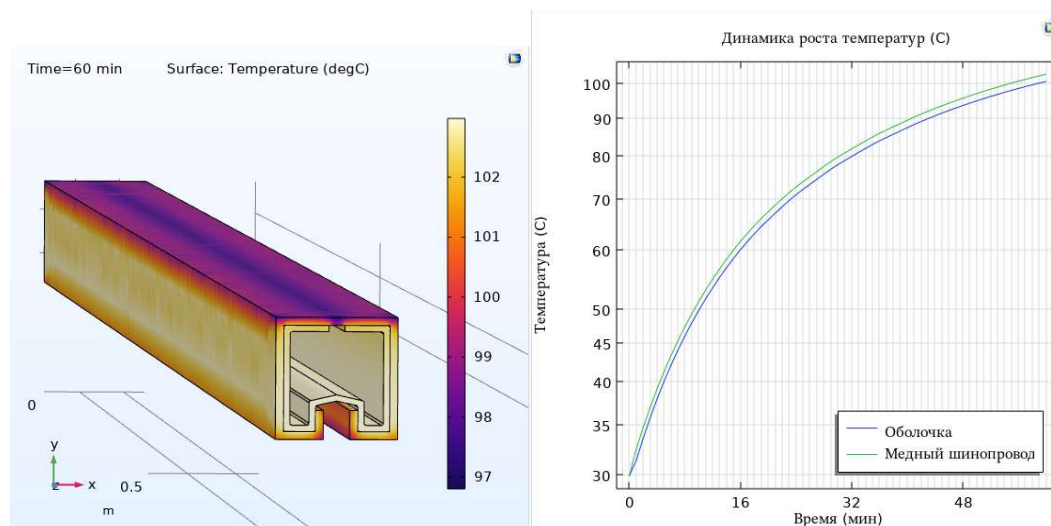


Рисунок 6.4 – Диаграмма распределения и изменения температур стального шинопровода и оболочки: Сечение 96 мм<sup>2</sup>, номинальный ток 140 А, температура окружающей среды 30 °С

Таблица 6.1 – Результаты моделирования для стального шинопровода

Модель	Сечение, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток, А	Температура окружающей среды, °С	Допустимая температура нагрева оболочки, °С	Температура нагрева оболочки, °С	Допустимая температура нагрева шинопровода, °С	Температура нагрева шинопровода, °С
URC C 012	64	120	20	90	78	95	84
URC C 012	64	120	30	90	89	95	93

Таблица 6.2 – Результаты моделирования для стального шинопровода

Модель	Сечение, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток, А	Температура окружающей среды, °С	Допустимая температура нагрева оболочки, °С	Температура нагрева оболочки, °С	Допустимая температура нагрева шинопровода, °С	Температура нагрева шинопровода, °С
URC C 014	64	140	20	90	90	95	92
URC C 014	64	140	30	90	100	95	102

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что температура нагрева оболочки не превышает допустимые значения для стального проводника сечением 64 мм<sup>2</sup>. Однако для проводника сечением 96 мм<sup>2</sup> температура оболочки превысила допустимые значения во втором случае.

Далее были рассчитаны погонные значения сопротивлений рассмотренных моделей шинопроводов с учетом температурной зависимости. Кроме того, были рассчитаны значения индуктивных сопротивлений. Сводные результаты моделирования представлены в таблице 7.

При передаче электроэнергии по проводам часть напряжения теряется на сопротивление проводов и в результате в конце линии напряжение получается меньшим, чем в начале линии. Понижение напряжения по сравнению с нормальным сказывается на работе токоприемника. Поэтому отклонения напряжений не должны превышать допустимых норм. Согласно ПУЭ, для силовых сетей отклонение напряжения от нормального должно составлять не более  $\pm 5\%$ .

Фазные троллеи шинопровода имеют идентичное геометрическое строение и размеры, поэтому для расчета их потерь напряжения, с учетом активного и реактивного сопротивления достаточно включения одной из троллеев шинопровода.

В общем случае фазные потери напряжения с достаточной степенью приближения определяются выражением:

$$\Delta U = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi),$$

где  $R$  и  $X$  - соответственно активное и индуктивное сопротивление фазы шинопроводов;  $\varphi$  – угол сдвига между током и фазным напряжением.

Таблица 7 – Параметры рассмотренных моделей шинопроводов

Модель	Сечение, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток, А	Температура окружающей среды, °С	Температура нагрева шинопровода, °С	Активное сопротивление, мОм/м	Индуктивное сопротивление, мОм/м
<b>Медь</b>						
URC C 025	64	250	20	78	0,331	0,129
URC C 025	64	250	30	86	0,340	0,129
URC C 040	96	400	20	100	0,237	0,180
URC C 040	96	400	30	110	0,244	0,180
<b>Сталь</b>						
URC C 012	64	120	20	84	2,207	0,129
URC C 012	64	120	30	93	2,291	0,129
URC C 014	96	140	20	92	1,521	0,180
URC C 014	96	140	30	102	1,583	0,180

Расчеты потерь напряжения для рассмотренных форм шинопровода изготовленных из разных материалов (медь, сталь), с сечениями 64 мм<sup>2</sup> и 96 мм<sup>2</sup>, представлены в таблице 8. Длина шинопровода для расчета была взята 100 м.

Таблица 8 – Результаты расчета падения напряжения  $\Delta U$  (%)

Температура окружающей среды 20 °С			
Медь сечением 64 мм <sup>2</sup>	Медь сечением 96 мм <sup>2</sup>	Сталь сечением 64 мм <sup>2</sup>	Сталь сечением 96 мм <sup>2</sup>
1,82	2,42	3,84	2,75
Температура окружающей среды 30 °С			
1,85	2,45	3,97	2,85

Как видно из представленных расчетов падение напряжения  $\Delta U$  (%) не превысило значение в  $\pm 5$  %, что говорит о том, что потери напряжения в рассмотренных моделях шинопроводов не превышают установленных норм.

### Заключение

1. Предложенная методика теплового моделирования с использованием программного комплекса Comsol показала высокую точность расчётов, которая подтверждена экспериментальными данными. Это делает методику подходящей для проектирования шинопроводов различных сечений, форм и материалов.

2. Установлено, что температурный режим шинопровода сильно зависит от материала и геометрических параметров шин. Для медных шинопроводов квадратного сечения предложенные параметры обеспечивают минимальные потери энергии и равномерное распределение тепла. Несмотря на то, что исследование не учитывало влияние скин-эффекта, а также потери в контактных соединениях и взаимные индуктивности, предлагаемая методика может быть использована для расчета основных параметров шинопровода квадратичного сечения.

3. При применении стальных шинопроводов рекомендуется либо ограничить рабочее время (например, до 1 часа), либо использовать дополнительные меры охлаждения. Это поможет избежать превышения допустимых температур нагрева.

4. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта шинопроводов с другими сечениями и формами, что расширяет область применения методики. Это особенно актуально для систем с повышенными требованиями к энергоэффективности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин, С.В. Троллейные шинопроводы в системах электроснабжения предприятий / С.В. Воронин, Н.Н. Курочкин, С.П. Мокринский // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 1. – С. 9-14.

2. Анатолий, А.Ф. Шинопровод: надежное и экономичное решения для эффективного электроснабжения без потерь / А.Ф. Анатолий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 11. – С. 7-11.
3. Чальян, К.М. Методы расчета электромагнитных параметров токопроводов. / К.М. Чальян. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 280 с.
4. Закарюкин, В.П. Системный подход к моделированию многоамперных шинопроводов / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В.Ю. Соколов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № 2. – С. 68-72.
5. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия.
6. ГОСТ 26346-84. Шинопроводы осветительные напряжением до 660 В переменного тока. Общие технические условия.
7. Троллейный шинопровод E-Line URC-S / URC-SX. <https://www.eaelectric.com/ru/uni-railconductor-trolley-busbar/e-line-urc-s>.
8. Lotiya, J. Thermal analysis and optimization of temperature rise in busbar joints configuration by FEM / J. Lotiya // 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON). Delhi, India. – 2014. – pp. 1-5.
9. Zanje, S.R. Design Optimization of Electrical Busbars of Power Distribution System using Taguchi Method / S.R. Zanje, I., Jain // 2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). – Gorakhpur, India. – 2018. – pp. 1-7.
10. Кузнецов, М.И. Основы электротехники / М.И. Кузнецов. – М.: Высшая школа. – 1964. – 560 с.

**Салихов Раиль Равилович**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
студент, 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: salihovrail06@gmail.com

**Рахманкулов Шамиль Фаридович**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань  
студент, 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

SALIKHOV R.R., RAKHMANKULOV SH.F., VORKUNOV O.V., GARIFULLIN M.SH.

## STUDY OF TEMPERATURE CONDITIONS OF TROLLEY BUSBARS OPERATION

**Abstract.** This paper considers the modeling of thermal modes of trolley busbars used for power supply of shop equipment. Simulation modeling was carried out in Comsol software package. Verification of the thermal model was carried out by comparing the simulation results with laboratory tests. The developed model allows to simulate the operation mode of busbars at different ambient temperatures and current loads. The results of temperature distribution in the volume of copper and steel busbar conductors, as well as in the protective sheath of PVC material at ambient temperatures of 20°C and 30°C are presented. The method of calculation of busbar conductor parameters included determination of active and reactive resistances taking into account the results of temperature modeling. On the basis of the calculated data for different materials (copper, steel) the calculation of voltage losses at different load power factors was carried out. The developed calculation methodology is the basis for further creation of automated busbar line design systems that take into account different operating conditions and the used conductive material.

**Keywords.** trolley busbar, temperature, resistance, voltage losses.

## BIBLIOGRAPHY

1. Voronin, S.V. Trolley busbars in the systems of power supply of the enterprises / S.V. Voronin, N.N. Kurochkin, S.P. Mokhrinsky // *Electrical equipment: operation and repair*. - 2011. - № 1. - С. 9-14.
2. Anatoly, A.F. Busbar: a reliable and economical solution for the effective power supply without losses / A.F. Anatoly // *Devices and systems. Management, control, diagnostics*. - 2016. - № 11. - С. 7-11.
3. Chalyan, K.M. Calculation methods of the electromagnetic parameters of the current conduits. / K.M. Chalyan. - Moscow: Energoatomizdat, 1990. - 280 с.
4. Zakaryukin, V.P. System approach to modeling of the multi-ampere busbar conductors (in Russian) / V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, V.Yu. Sokolov // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. - 2008. - № 2. - С. 68-72.
5. GOST 31996-2012. Power cables with plastic insulation for rated voltage 0,66; 1 and 3 kV. General technical conditions.
6. GOST 26346-84. Lighting busbars with voltage up to 660 V AC. General technical conditions.
7. E-Line URC-S / URC-SX trolley busbar conductor. <https://www.eaelectric.com/ru/uni-railconductor-trolley-busbar/e-line-urc-s>.
8. Lotiya, J. Thermal analysis and optimization of temperature rise in busbar joints configuration by FEM / J. Lotiya // 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON). Delhi, India. – 2014. – pp. 1-5.
9. Zanje, S.R. Design Optimization of Electrical Busbars of Power Distribution System using Taguchi Method / S.R. Zanje, I. Jain // 2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). – Gorakhpur, India. – 2018. – pp. 1-7.
10. Kuznetsov, M.I. Fundamentals of electrical engineering / M.I. Kuznetsov. - Moscow: Higher School. - 1964. - 560 с.

### **Salikhov Rail Ravilovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

student, masters student, profile “Electric power systems, networks, power transmission, their modes, stability and reliability”

51 Krasnoselskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia

Тел. 8(843) 519-42-72

E-mail: salihovrail06@gmail.com

### **Rakhmankulov Shamil Faridovich**

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

student, masters student, profile “Electric power systems, networks, power transmission, their modes, stability and reliability”

51 Krasnoselskaya str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia

Тел. 8(843) 519-42-72

E-mail: shamil74000@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 str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia

Тел. 8(843) 519-42-72

E-mail: vorcunov\_oleg@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 str., Kazan, Republic of Tatarstan, 420066, Kazan, Russia

Тел. 8(843) 519-42-72

E-mail: g\_marsels@mail.ru

© Салихов Р.Р., Рахманкулов Ш.Ф., Гарифуллин М.Ш., Воркунов О.В., 2025

КАЧАНОВ А.Н., ЧЕРНЫШОВ В.А., СЕМЕНИХИН Д.И.

## СПОСОБ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА ОДНОФАЗНЫЕ В ВОЗДУШНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

**Аннотация.** Обосновывается целесообразность применения нового инженерно-технического решения, обеспечивающего возможность простой и мало затратной реализации способа оперативного перевода двойного замыкания на землю, развивающегося в воздушной электрической сети 10 кВ с изолированной нейтралью в ослабленные однофазные замыкания на землю. Характерной особенностью предлагаемого схмотехнического решения является использование в качестве коммутационных устройств высоковольтных штепсельных разъемов, а не дистанционно управляемых автоматических выключателей. При этом установление соответствующего порядка прямого чередования фаз для воздушной линии электропередачи с развивающимся двойным замыканием на землю осуществляется дежурным подстанции, путем оперативной ручной перестановки штыревых токоведущих частей высоковольтных штепсельных разъемов, относительно фиксирующих их гнездовых токоведущих частей при кратковременно снятом напряжении.

**Ключевые слова:** воздушная электрическая сеть 10 кВ с изолированной нейтралью; развивающееся двойное замыкание на землю; ослабленное однофазное замыкание на землю, изменение порядка прямого чередования фаз, высоковольтный штепсельный разъем, оперативное переключение.

### Введение

С целью повышения эффективности функционирования воздушной электрической сети (ВЭС) 10 кВ с изолированной нейтралью работающей с однофазным замыканием на землю (ОЗНЗ) на кафедре электрооборудования и энергосбережение ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» был разработан способ оперативного перевода двойного замыкания на землю (ДЗНЗ), развивающегося в ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью в ОЗНЗ, разнесенное по разным функционирующим воздушным линиям электропередачи (ВЛЭП) [1].

В ходе апробации данного способа на научных семинарах форумах и конференциях на него обратили внимание представители ПАО "Интер РАО". В ходе продолжения научно-исследовательской работы, направленной на совершенствование многообещающего алгоритма лежащего в основе разработанного способа, его разработчиками было найдено эффективное решение, позволяющее оптимизировать его работу и способствующее его более быстрому продвижению в серийное применение. В результате этой работы авторами были выявлены и полностью устранены имеющиеся схмотехнические недостатки.

Во-первых, была устранена необходимость в использовании 9-ти однополюсных коммутационных аппаратов для каждой ВЛЭП 10 кВ, обеспечивающих 3-ри варианта изменения порядка прямого чередования ее фаз [2]. Это, в свою очередь, позволило разработчикам отказаться от применения системы автоматического управления, включающей в себя сложноорганизованные цепи блокировок, исключающие возможность одновременного нахождения нескольких коммутационных аппаратов в замкнутом положении. Необходимо отметить, что имеющие место недостатки обуславливали высокую стоимость практической реализации и последующей эксплуатации данного способа, а также инициировали относительно низкий уровень надежности используемых в нем схмотехнических решений. Устранение выявленных схмотехнических недостатков стало возможно благодаря замене дорогостоящих коммутационных аппаратов на более дешевые однополюсные высоковольтные штепсельные разъемы, позволяющей отказаться от автоматической дистанционной коммутации и перейти на оперативное ручное переключение, реализуемое дежурным персоналом подстанции [3].

### Основная часть

Прежде чем перейти к рассмотрению разработанного способа, авторы считают целесообразным довести до сведения читателей следующую полезную информацию. Разъемы высоковольтные штепсельные РВШ - 6(10)/400 УХЛ1 (см. рисунок 1), предназначены для соединения между собой отрезков силовых гибких кабелей напряжением 6 и 10 кВ с резиновой изоляцией, а также для присоединения этих кабелей к передвижному электрооборудованию (подстанциям, приключательным пунктам) и различным технологическим машинам (экскаваторам, бурстанкам и т.п.) в условиях подвижного характера работ в горной и других отраслях промышленности. РВШ - 6(10)/400 УХЛ1 эксплуатируются на предприятиях Кузбасса, Якутии, Урала и др.



а)



б)

**Рисунок 1 – Внешний вид разъема высоковольтного штепсельного РВШ - 6(10)/400 УХЛ1 в зафиксированном а) и разомкнутом б) состояниях**

Учитывая специфику применения РВШ - 6(10)/400 УХЛ1, данные электротехнические изделия, скорее всего, мало знакомы инженерно-техническим работникам, проектирующим схемы электрических соединений подстанций ПС 110/35/10, 110/10, 35/10 кВ и использующим при этом главным образом типовые схмотехнические решения [4].

Они, вероятней всего также малоизвестны и инженерно-техническим работникам ПАО «Россети-Центр», эксплуатирующим ВЭС с изолированной нейтралью данного класса напряжения. А вместе с тем, они являются более безопасными и надежными по сравнению с кабельными муфтами и соединительными коробками.

В России единственным предприятием, выпускающим РВШ - 6(10)/400 УХЛ1 является компания "Объединенная Энергия", г. Москва. По своим техническим характеристикам и массогабаритным показателям отечественные недорогие РВШ превышают показатели зарубежных аналогов (фирм "Adalet - PLM", "Scott Fetzer", США; "Sidas" ФРГ; "Patton Cooke", Канада; "Nanaboshi Electric", Япония; "Electroteknika", Индия и др.).

Реализация оперативного ручного переключения, изменяющего прямой порядок прямого чередования фаз для ВЛЭП 10 кВ, имеющей развивающееся ДЗНЗ, может быть осуществлена на подстанциях, имеющих оперативный пункт управления с постоянно пребывающим там дежурным персоналом. В будущем, в процессе развития робототехники, функции переключения, скорее всего, будут возложены на робота-манипулятора.

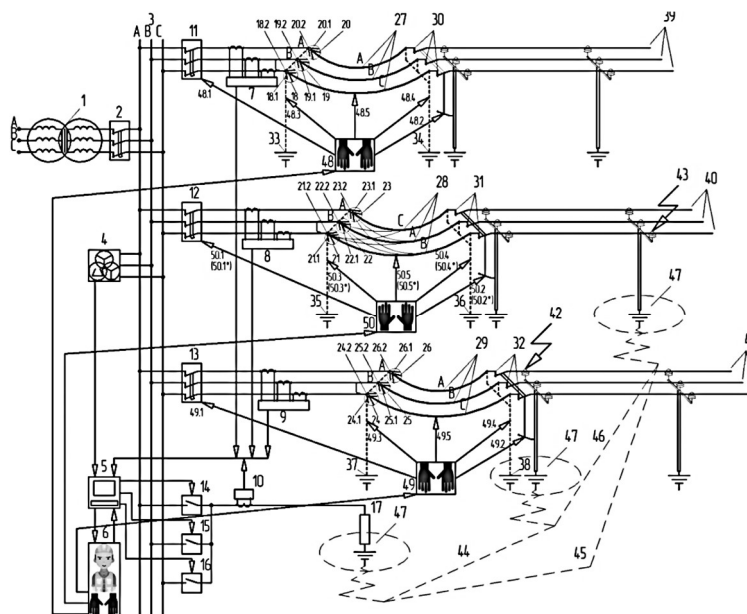
На рисунке 2 представлена принципиальная электрическая схема оперативного перевода развивающегося в воздушной электрической сети 10 кВ с изолированной нейтралью ДЗНЗ в ослабленное ОДНЗ разнесенное по разным функционирующим ВЛЭП.

Работа предлагаемого авторами способа осуществляется следующим образом. При возникновении устойчивого ОЗНЗ любой из фаз А, В или С одной из ВЛЭП 39, 40 или 41 электрической сети с изолированной нейтралью, например, устойчивого повреждения 42 изоляции фазы А ВЛЭП 41, а также слабого, развивающегося дефекта изоляции на одной из фаз, разноименных с фазой А, на любой другой ВЛЭП 39 или 40, например, слабого развивающегося дефекта 43 изоляции фазы С ВЛЭП 40, устройство 4 неселективного контроля изоляции, подключенное к шинам 3 низковольтного напряжения, регистрирует появление напряжения нулевой последовательности и формирует сигнал. Данный сигнал поступает на терминал 5 автоматической идентификации повреждений изоляции, который автоматически формирует команду однофазным выключателям 14, 15 и 16 на поочередное кратковременное периодическое включение на землю фаз А, В и С шин 3 низковольтного напряжения 3 через низкоомный заземляющий резистор 17 для создания искусственного ДЗНЗ, по путям 44, 45 протекания тока искусственного ДЗНЗ.

При этом, в фазе А, имеющей устойчивое повреждение 42 изоляции ВЛЭП 41, подключенной к коммутационному аппарату 13, через высоковольтные штепсельные разъемы 24, 25, 26, токоподвод 29 из гибких изолированных проводов и высоковольтный разъединитель 32 в момент поочередного кратковременного периодического включения на землю одной из фаз В или С шин 3 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 17 будет фиксироваться датчиком 9 тока в фазе А и датчиком 10 тока в фазах В или С одновременное большое увеличение тока.

Одновременно с этим в фазе С, имеющей развивающийся дефект 43 изоляции ВЛЭП 40, подключенной к коммутационному аппарату 12 автоматической защиты, через высоковольтные штепсельные разъемы 21, 22, 23, токоподвод 28 из гибких изолированных проводников и высоковольтный разъединитель 31 в момент поочередного кратковременного

периодического включения на землю одной из фаз А или В шин 3 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 17 будет фиксироваться датчиком 8 тока в фазе С и датчиком 10 тока в фазах А или В одновременное слабое увеличение тока.



**Рисунок 2 - Принципиальная электрическая схема оперативного перевода ДЗНЗ развивающегося в ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью в ослабленное ОДНЗ, разнесенное по разным функционирующим ВЛЭП**

Также при этом в фазах А, В и С ВЛЭП 39, не имеющих повреждений изоляции, подключенной к групповому аппарату 11 автоматической защиты через высоковольтные штепсельные разъемы 18, 19 и 20, токоподвод 27 из гибких изолированных проводников и высоковольтный разъединитель 30, в момент поочередного кратковременного периодического включения на землю любой из фаз А, В и С шин 3 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 17 не будет зафиксировано датчиками 7 тока в фазе А и датчиком 10 тока в фазах А, В и С одновременного увеличения тока.

При поступлении на терминал 5 автоматической идентификации повреждений изоляции информации об отсутствии одновременного увеличения тока с датчиков 7 и 10 тока, а также информации с датчиков 8 и 9 тока, подтверждающей одновременное увеличение токов в фазе А ВЛЭП 41 на величину  $\Delta I_{\Delta}$  в фазе С ВЛЭП 40 на величину  $\Delta I_C < \Delta I_A$ , происходящее одновременно с появлением тока в фазе В, фиксируемое датчиком 10 тока, в момент кратковременного периодического включения на землю только фазы В шин 3 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 17, последний идентифицирует в электрической сети развивающееся ДЗНЗ, обусловленное устойчивым повреждением 42 изоляции фазы А на ВЛЭП 41 и развивающимся дефектом 43 изоляции фазы С на ВЛЭП 40.

В результате этого терминал 5 автоматической идентификации повреждений изоляции формирует команду дежурному подстанции 6 выполнить задание №1 режима 50 действия, предписывающего произвести отключение 50.1 группового аппарата 12 автоматической защиты, установление 50.2 переносного защитного заземления 35, отключение 50.3 высоковольтного разъединителя 31, установку 50.4 переносного защитного заземления 36, изменение 50.5 порядка чередования фаз А, В, С на С, А, В путем взаимного перемещения штыревых токоведущих частей 21.1, 22.1, 23.1 соответствующих высоковольтных штепсельных разъемов 21, 22, 23 относительно фиксирующих их гнездовых токоведущих частей соответственно 21.2, 22.2, 23.2 таким образом, чтобы фаза ВЛЭП 40, имеющая развивающийся дефект 43 изоляции, через высоковольтный разъединитель 31, гибкий изолированный проводник токоподвода 28 и групповой аппарат 12 автоматической защиты была подключена к той же фазе А шин 3 низковольтного напряжения, к которой через высоковольтный разъединитель 32, гибкий изолированный проводник токоподвода 29 и групповой аппарат 13 автоматической защиты подключена фаза ВЛЭП 41, имеющая устойчивое повреждение 42 изоляции.

Одновременно с этим терминал 5 автоматической идентификации повреждений изоляции будет формировать команды дежурному подстанции 6 на реализацию режима 48

бездействия, предписывающего не производить отключение 48.1 группового аппарата 11 автоматической защиты, отключение 48.2 высоковольтного разъединителя 30, установку 48.3 переносного защитного заземления 33, установку 48.4 переносного защитного заземления 34, изменение 48.5 порядка чередования фаз А, В и С, подаваемых через токоподвод 27 из гибких изолированных проводников на ВЛЭП 39 путем взаимного перемещения штыревых токоведущих частей 18.1, 19.1, 20.1 соответствующих высоковольтных штепсельных разъемов 18, 19, 20 относительно фиксирующих их гнездовых токоведущих частей соответственно 18.2, 19.2, 20.2, режима 49 бездействия, предписывающего не производить отключение 49.1 группового аппарата 13 автоматической защиты, отключение 49.2 высоковольтного разъединителя 32, установку 49.3 переносного защитного заземления 37, установку 49.4 переносного защитного заземления 38, изменение 49.5 порядка чередования фаз А, В и С, подаваемых через токоподвод 29 из гибких изолированных проводников на ВЛЭП 41, путем взаимного перемещения штыревых токоведущих частей 24.1, 25.1, 26.1 соответствующих высоковольтных штепсельных разъемов 24, 25, 26 относительно фиксирующих их гнездовых токоведущих частей соответственно 24.2, 25.2, 26.2.

После успешного выполнения режимов 48 и 49 бездействия, а также режима 50 действия, включающего выполнение задания № 1, дежурный подстанции 6 активизирует обратную связь с терминалом 5 автоматической идентификации повреждений изоляции, в результате чего он получает от последнего команду на выполнение задания №2 режима 50 действия, предписывающего произвести снятие 50.4\* переносного защитного заземления 36, снятие 50.3\* переносного защитного заземления 35, включение 50.2\* высоковольтного разъединителя 31, включение 50.1\* группового аппарата 12 автоматической защиты.

После активизации в работу ВЛЭП 40, имеющей слабый развивающийся дефект 43 изоляции фазы А, при функционирующей ВЛЭП 41, имеющей устойчивое повреждение изоляции 42 фазы А, устройство 4 неселективного контроля изоляции, подключенное к шинам 3 низковольтного напряжения, будет продолжает регистрировать существование напряжения нулевой последовательности и формировать соответствующий сигнал.

Данный сигнал поступает на терминал 5 автоматической идентификации повреждений изоляции, который автоматически формирует команду однофазным выключателям 14, 15, 16 на поочередное кратковременное периодическое включение на землю фаз А, В и С шин 3 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 17 для создания искусственного ДЗНЗ по путям 44 и 45 протекания тока искусственного ДЗНЗ. При этом в фазе А ВЛЭП 41, имеющей устойчивое повреждение 42 изоляции, и фазе А ВЛЭП 40, имеющей слабый дефект 43 изоляции, будет одновременно фиксироваться соответственно датчиками 9, 8 тока увеличение тока, совпадающее по времени с увеличением тока, фиксируемого датчиком 10 тока, протекающего в одной из фаз В или С шин 3 низковольтного напряжения в момент их поочередного кратковременного периодического включения на землю через низкоомный заземляющий резистор 17.

При этом увеличение тока  $\Delta I_{A1}$  в фазе А ВЛЭП 41, имеющей устойчивое повреждение 42 изоляции и увеличение тока  $\Delta I_{A2}$  в фазе А ВЛЭП 40, имеющей развивающийся дефект 43 изоляции, сопровождающееся увеличением тока  $\Delta I_{B(C)} = \Delta I_{A1} + \Delta I_{A2}$ , фиксируемое датчиком 10 тока, в одной из фаз В или С шин 3 низковольтного напряжения в момент их периодического поочередного кратковременного включения на землю, через низкоомный заземляющий резистор 17, не должно приводить к отключению ВЛЭП 40 и 41 соответствующими групповыми аппаратами 12 и 13 автоматической защиты. Это обеспечивается подбором оптимальной величины сопротивления низкоомного заземляющего резистора 17, учитывающим параметры ВЛЭП 39, 40 и 41 и переходное сопротивление грунта.

Периодичность поочередных кратковременных включений на землю фаз А, В и С шин 3 низковольтного напряжения через низкоомный заземляющий резистор 17 определяется опытным путем, позволяющим обеспечивать минимальный рост эскалации дефектов изоляции, в зависимости от действующих погодных-климатических факторов и технического состояния линейной изоляции каждой из ВЛЭП 39, 40, 41[5].

В нормальном режиме работы электрической сети с изолированной нейтралью напряжения фаз относительно потенциала земли ( $U_\phi$ ) одинаковы и составляют  $U_\phi = U_L / \sqrt{3}$ , где  $U_L$  - линейное напряжение сети. При возникновении устойчивого повреждения 42 изоляции фазы А ВЛЭП 41 эта фаза приобретает потенциал земли, в результате чего напряжение двух других неповрежденных фаз В и С электрической сети относительно земли возрастает до линейного значения, т.е. увеличивается в  $\sqrt{3}$  раз.

При этом, вследствие перенапряжения, в электрической сети возникает развивающееся ДЗНЗ, в данном случае проявляется дефект 43 изоляции в фазе С ВЛЭП 40, при этом формируется путь 46 кратковременного протекания тока развивающегося ДЗНЗ, а вокруг его стекания на землю формируется потенциально опасная зона 47 действия шагового напряжения. Развивающееся ДЗН, на начальной стадии характеризуется незначительным несимметричным увеличением тока, в частности, протекающего через землю, между устойчивым повреждением 42 изоляции фазы А ВЛЭП 41 и развивающимся дефектом 43 изоляции фазы С ВЛЭП 40, а также на всем протяжении каждого из участков ВЛЭП 41 и 40, начинающихся от точки их присоединения к групповым аппаратам 12 и 13 автоматической защиты и заканчивающимся местом возникновения в них повреждений 42 и 43 изоляции.

Вероятность того, что развивающееся ДЗНЗ за короткий период времени перейдет в устойчивое ДЗНЗ, очень высока и этот переход будет сопровождаться коротким замыканием, вызывающим автоматическое отключение одной, а возможно, и сразу двух ВЛЭП, в данном случае, 40 и /или 41. При этом при нарушении изоляции одной из фаз А, В и С на одной из ВЛЭП 39, 40, 41 через нее начинает протекать ток смещения, обусловленный действием переменного электрического поля между проводами фаз, а также между проводами и землей.

В данном случае, преодолевая сопротивление устойчивого повреждения 42 или развивающегося дефекта 43 изоляции, вместе с током развивающегося ДЗНЗ, этот ёмкостной ток, стекая на землю, также участвует в формировании потенциально-опасной зоны 47 действия шагового напряжения.

### Заключение

Оперативный перевод ДЗНЗ, развивающегося в ВЭС 10 кВ с изолированной нейтралью в ОЗНЗ, разнесенные по разным ВЛЭП 40 и 41, обеспечивает:

- ослабление динамики развития дефекта 43 изоляции, обеспечивающегося выводом ее из-под действующего в сети перенапряжения;
- устранение эскалации диэлектрических и тепловых потерь, обеспечивающегося прерыванием пути 46 распространения дугового пробоя;
- повышение коммутационного ресурса групповых аппаратов 12 и 13 автоматической защиты, достигаемого за счет сокращения количества их срабатываний при ДЗНЗ;
- уменьшение потенциальной опасности от электротравматизма, обеспечивающегося за счет устранения потенциально опасной зоны 47 действия шагового напряжения, формирующейся при развивающемся ДЗНЗ;
- устранение технических потерь электроэнергии, вызванных тепловым действием тока при развивающемся ДЗНЗ;
- обеспечение возможности одновременного функционирования для ВЛЭП 40 и 41 с поврежденной изоляцией, после кратковременного отключения и последующего включения в работу ВЛЭП 40 с соответствующим измененным порядком чередования фаз.

Предлагаемый более простой и надежный вариант реализации алгоритма противодействия развивающимся ДЗНЗ, позволяет сфокусировать на него более пристальное внимание специалистов проектирующих и эксплуатирующих подстанционное и электросетевое оборудование, а в случае его практического внедрения использовать вышеперечисленные эффекты для создания более благоприятных условий функционирования ВЭС 10 кВ с поврежденной изоляцией.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пат. 2809770 Российская Федерация, МПК Н02Н 9/08. Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью / Качанов А.Н., Чернышов В.А., Лукьянов Г.В., Даровых А.С.; заявитель ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.Тургенева»; заявл. 20.12.2022; опубл. 18.12.2023. Бюл. № 35. – 10 с.
- 2 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.
- 3 ГОСТ Р 55606-2013 Разъемы высоковольтные штепсельные для присоединения карьерного электрооборудования к электрическим сетям. Общие технические условия. - Москва: Изд-во ФГУП Стандартинформ, 2014 – 17 с.
- 4 Кокин, С.Е. К59 Схемы электрических соединений подстанций: учебное пособие / С. Е. Кокин, С.А. Дмитриев, А.И. Халысмаа. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015.– 100 с.
- 5 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. – Орел: ООО «Издательский дом «ОРЛИК» и К», 2007, С. 129 – 131

**Качанов Александр Николаевич**  
ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С.  
Тургенева", г. Орел,  
доктор технических наук,  
профессор, академик АЭН РФ, зав.  
каф. электрооборудования и  
энергосбережения  
302020 г. Орел, Наугорское шоссе,  
д. 29  
Тел. 8(4862)-41-98-53  
E-mail: kan@ostu.ru

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

**Семенihin Даниил Игоревич**  
ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С.  
Тургенева", г. Орел,  
магистрант 1 курса, направления  
подготовки 13.04.02  
«Электроэнергетика и  
электротехника»  
302020 г. Орел, Наугорское шоссе,  
д. 29  
Тел. 8(4862)-41-98-30,  
E-mail: semenihin\_30\_01\_99@mail.ru

KACHANOV A.N., CHERNYSHOV V.A., CHSEMENIKHIN D.I.

## METHOD OF OPERATIVE SWITCHING OF DOUBLE EARTH FAULTS TO SINGLE-PHASE ONES IN 10 kV OVERHEAD ELECTRIC NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

**Abstract.** *The paper substantiates the feasibility of using a new engineering and technical solution that provides the possibility of a simple and low-cost implementation of the method for promptly converting a double ground fault developing in a 10 kV overhead electrical network with an isolated neutral into weakened single-phase ground faults. A characteristic feature of the proposed circuit solution is the use of high-voltage plug-in connectors as switching devices, rather than remotely controlled circuit breakers. In this case, the establishment of the appropriate order of direct phase alternation for an overhead power line with a developing double ground fault is carried out by the substation duty officer, by promptly manually rearranging the pin current-carrying parts of the high-voltage plug-in connectors relative to the socket current-carrying parts that fix them when the voltage is briefly removed.*

**Keywords:** *10 kV overhead electrical network with an isolated neutral; developing double ground fault; weakened single-phase earth fault, change of direct phase sequence, high-voltage plug-in connector, operational switching.*

### BIBLIOGRAPHY

- 1 Patent 2809770 Russian Federation, IPC H02H 9/08. Method for converting a distributed double earth fault into a single-phase fault in networks with an isolated neutral / Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Lukyanov G.V., Darovykh A.S.; applicant FGBOU VO "Odessa State University named after I.S. Turgenev"; declared 20.12.2022; published 18.12.2023. Bulletin No. 35. – 10 p.
- 2 Nabatov, K.A. High-voltage vacuum circuit breakers of distribution devices: a tutorial / K.A. Nabatov, V.V. Afonin. - Tambov: Publishing house of the State Educational Institution of Higher Professional Education TSTU, 2010. - 96 p.
- 3 GOST R 55606-2013 High-voltage plug-in connectors for connecting quarry electrical equipment to electrical networks. General specifications. - Moscow: Publishing house of FSUE Standartinform, 2014 - 17 p.
- 4 Kokin, S.E. K59 Electrical connection diagrams of substations: a tutorial / S.E. Kokin, S.A. Dmitriev, A.I. Khalyasmaa.- Yekaterinburg: Publishing house of the Ural. University, 2015. – 100 p.
- 5 Koroleva, T.G. Behavior of differential protection during sequential switching / T.G. Queen, S.N. Kurguzova // Energy and resource saving – XXI century.: Collection of materials of the V national scientific and practical Internet conference. – Orel: OOO "Izdatelskiy dom "ORLIK" i K", 2007, pp. 129 – 131

**Kachanov Aleksandr Nikolaevich**  
FGBOU VO "OSU named after I.S.  
Turgenev", Orel,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Academician of the Russian  
Academy of Economic Sciences, Head  
of the Department of Electrical  
Equipment and Energy Saving  
302020 Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Tel. 8(4862)-41-98-53  
E-mail: kan@ostu.ru

**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

**Semenikhin Daniil Igorevich**  
FGBOU VO "OSU named after I.S.  
Turgenev", Orel,  
1st 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: semenihin\_30\_01\_99@mail.ru

© Качанов А.Н., Чернышов В.А., Семенihin Д.И., 2025

БАРАКИН Н.С., СТРИЖКОВ И.Г., ВОЛОШИН А.П., КОРЕНКОВ Д.А.

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ В SIMINTECH

**Аннотация.** В статье проведен анализ автономных генераторов, использующихся для электроснабжения электрооборудования в сельском хозяйстве. Перспективным направлением является использование асинхронного генератора в составе автономного источника, так как он обладает бесконтактной системой возбуждения, повышающей эксплуатационные характеристики. Распределение конденсаторов возбуждения вдоль линии электроснабжения позволяет осуществить местную компенсацию реактивной мощности. В случае использования асинхронного генератора для электроснабжения электрооборудования (редукторный электропривод тележек) дождевальной машины кругового действия позволит снизить технические потери в линии электроснабжения, так как линия имеет большую протяженность, которая может достигать 1000 м. Приведен расчёт необходимой мощности генератора на базе серийного электродвигателя серии АИР и необходимых емкостей конденсаторных батарей для возбуждения генератора и снижения размагничивающего действия тока нагрузки. Аналитический расчет проверен с помощью разработанной компьютерной модели, имитирующей электроснабжение электрооборудования дождевальной машины кругового движения, выполненной в программе SimInTech.

**Ключевые слова:** Асинхронный генератор, имитационная модель, дождевальная машина, программа SimInTech.

### Введение

Автономное электроснабжение играет важную роль в сельском хозяйстве, так как современные технологические процессы сельского хозяйства насыщены электрооборудованием разных уровней напряжения и частоты в целях увеличения производительности труда [1]. Так как широко используется электроинструмент промышленной частоты 50 Гц, то решение вопроса электроснабжения серийным генератором не составляет серьезных затруднений. Переносные автономные источники достаточно широко представлены на рынке и позволяют обеспечивать энергией электрооборудование электротехнологических установок. Промышленность выпускает синхронные генераторы различных типов мощностью от 1 до 5 кВт·А, однако, для работы в полевых условиях при повышенной вибрации корпуса необходимы надежные бесконтактные генераторы. В составе мобильных автономных источников, как правило, входит асинхронная бесконтактная машина или синхронная машина с обмоткой возбуждения или с постоянными магнитами [2].

### Анализ

Перспективным направлением является исследование возможности применения асинхронной машины в качестве генератора. Многими авторами была показана эффективность применения асинхронного генератора (АГ) для питания электротехнологических установок в сельском хозяйстве [3]. Существенное уменьшение реактивной составляющей тока при подключении индуктивной нагрузки ограничивает использование таких генераторных установок. Поэтому чаще асинхронные генераторы используются в определенных технологических процессах для питания нагрузки с высоким коэффициентом мощности. Использование специальных статорных обмоток позволяет расширить функциональные возможности автономных источников с асинхронным генератором [4], но это ведет к усложнению статорных обмоток, удорожанию установки в целом, уменьшению эксплуатационных характеристик. Так, в случае преобразования роторной обмотки (асинхронный генератор с фазным ротором) теряется главное преимущество – бесконтактная система возбуждения [5].

Так как установку конденсаторов, необходимых для возбуждения асинхронного генератора, можно распределить по линии автономного электроснабжения, то одновременно возможно решить вопрос местной компенсации нагрузки и снизить электрические потери мощности в питающей линии [6]. Так, основными электроприёмниками дождевальной машины являются электроприводы с асинхронными двигателями с короткозамкнутой

роторной обмоткой, которые двигают тележки согласно заданной траектории движения. Дождевальные машины могут комплектоваться бустерным насосом, который позволяет орошать труднодоступные места, например, углы полей [7]. При этом длина кабеля питания может достигать 1000 метров.

### Расчет

Произведем расчет дождевальной машины с двумя тележками, приводимыми в движение двумя электродвигателями серии АИР мощностью 0,37 кВт и частотой вращения 3000 об/мин. Асинхронный генератор отдает в сеть только активную мощность, потребляя при этом из сети реактивную энергию для создания электромагнитного поля. В связи с этим необходимо рассчитать емкость конденсаторной батареи для возбуждения асинхронного генератора. В качестве такого генератора может быть использован серийный асинхронный двигатель [8]. Мощность генератора  $P_{\text{Аген}}$  равна мощности, потребляемой двигателями  $P_{2\text{дв}}$  из сети:

$$P_{\text{Аген}} = n \frac{P_{2\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}}} \quad (1)$$

Общая мощность, потребляемая двумя тележками равна:

$$\sum P_{\text{эдв}} = n \frac{P_{2\text{дв.н}}}{\eta_{\text{дв}}} = 2 \cdot \frac{370}{0,72} = 1027 \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $n$  - число электродвигателей тележек дождевальной машины, шт.;

$\eta_{\text{дв}}$  - КПД электродвигателя.

Мощность электродвигателя, работающего в режиме генератора:

$$P_{2\text{дв.н}} = P_{1\text{эл.н}} \eta_{\text{дв}} = \sum P_{\text{эдв}} \eta_{\text{н}} = 1027 \cdot 0,79 = 812 \text{ Вт}. \quad (3)$$

Из расчетов видно, что требуемый в качестве генератора электродвигатель должен иметь незначительную мощность около 1 кВт. В тоже время, из теории асинхронных машин известно, что для устойчивой работы одновременно включаемой нагрузки необходимо иметь мощность генератора примерно в три раза большую мощности этой нагрузки. Поэтому необходимо с трехкратным запасом мощности выбирать электродвигатель, предназначенный для работы в режиме асинхронного самовозбуждающегося генератора. В итоге из каталога асинхронных электродвигателей серии АИР выбран двигатель типа АИР112МВ8 мощностью 3 кВт и скоростью 750 об/мин.

Для возбуждения генератора определим мощность и емкость конденсаторной батареи. Мощность конденсаторной батареи найдена из [9]:

$$Q_{2\text{дв.н}} = S \sin \varphi = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 7,43 \cdot 0,67 = 3298 \text{ вар}, \quad (4)$$

где  $S$  – полная мощность генератора, кВт·А.

$U_{\phi}$  – фазное напряжение генератора, В.

$I_{\phi}$  – фазный ток генератора, А.

Емкость конденсаторов на фазу:

$$Q_{\phi} = \frac{Q}{3} = \frac{3298}{3} = 1099 \text{ вар}. \quad (5)$$

Емкость батареи конденсатора на фазу при соединении по схеме треугольник равна:

$$C_{\text{фг}} = \frac{Q_{\phi}}{\omega U_{\phi}^2} = \frac{1099}{314 \cdot 380^2} = 24 \text{ мкФ}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – угловая частота,  $314 \text{ с}^{-1}$ .

Поскольку асинхронный генератор реактивной энергии не вырабатывает, необходимо произвести компенсацию реактивной мощности нагрузки с помощью дополнительной конденсаторной батареи:

$$Q_{2\text{дв.н}} = S \sin \varphi = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 0,92 \cdot 0,54 = 330 \text{ вар}, \quad (7)$$

$$Q_{\phi} = \frac{Q}{3} = \frac{330}{3} = 110 \text{ вар.}$$

Емкость батареи конденсаторов на фазу при соединении их по схеме треугольник равна:

$$C_{\phi\Delta} = \frac{Q_{\phi}}{\omega U_{\phi}^2} = \frac{110}{314 \cdot 380^2} = 2,42 \text{ мкФ.}$$

Для компенсации размагничивающего действия тока нагрузки генератора необходимо подключать дополнительную емкость к генератору в размере 30...40 % от емкости возбуждения, т.е.

$$C_k = 0,3 \cdot C_{\phi\Gamma} = 0,3 \cdot 24 = 8 \text{ мкФ.} \quad (8)$$

При подключении двух электродвигателей тележек дождевальной машины общая емкость конденсаторной батареи на фазу равна:

$$\sum C = C_{\phi\Gamma} + 2C_{\phi\Delta} + C_k = 24 + 2 \cdot 2,42 + 8 \approx 37 \text{ мкФ.} \quad (9)$$

Разработана компьютерная модель, имитирующая электроснабжение электрооборудования дождевальной машины кругового движения в программе SimInTech (рисунок 1), в которой параметры блоков асинхронного генератора (М1), электродвигателей (М2, М3) и конденсаторов возбуждения ( $C_{\text{в}}$ ,  $C_{\text{ад1}}$  и  $C_{\text{ад2}}$ ) настроены согласно полученным расчетным данным.

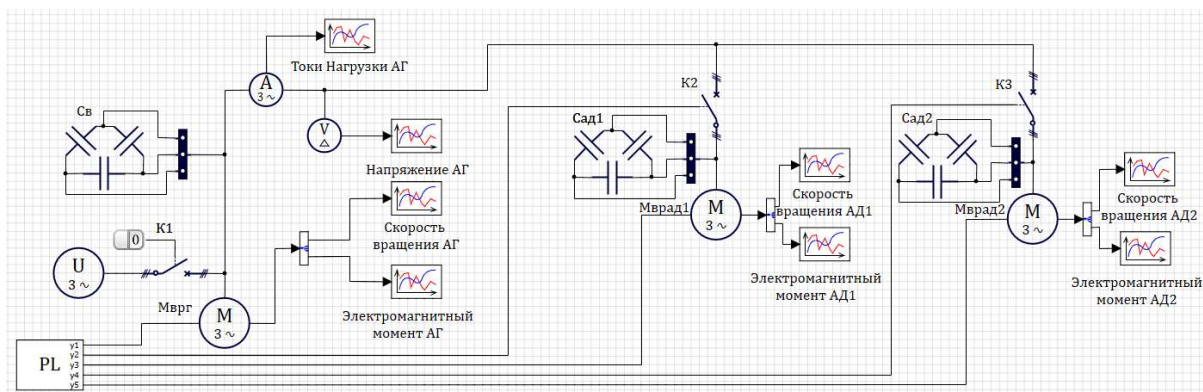


Рисунок 1 - ИКМ электроснабжения электрооборудования дождевальной машины

В разработанной имитационной компьютерной модели (ИКМ) предложено конденсаторы асинхронного генератора распределить по линии электроснабжения путём их подключения на выводах электродвигателей тележек, что одновременно обеспечивает необходимое возбуждение и местную компенсацию реактивного тока. Асинхронный генератор и асинхронные двигатели представлены блоками М1-М3, которые в программе SimInTech разработаны на основе Т-образной схемы замещения [10], для которой справедлива система уравнений (10)-(15):

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \psi_{qs}; \quad u_{ds} = R_d i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs}; \quad (10)$$

$$u_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r Z_p) \psi_{dr}; \quad (11)$$

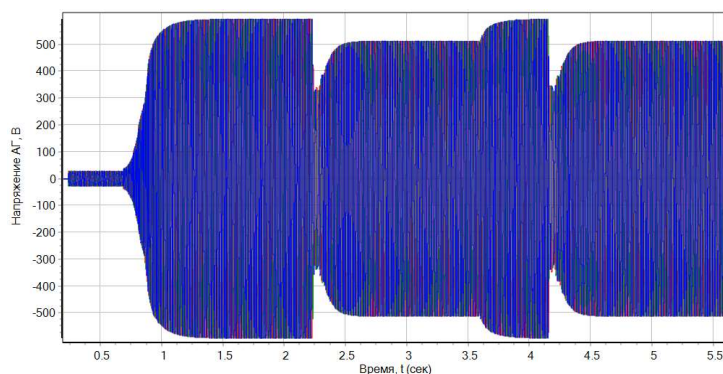
$$u_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r Z_p) \psi_{qr}; \quad (12)$$

$$M_B = 1,5 Z_p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{qd}); \quad \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_B - M_c - \omega_r); \quad (13)$$

$$\psi_{qs} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}; \quad \psi_{ds} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}; \quad (14)$$

$$\psi_{qr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}; \quad \psi_{dr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}. \quad (15)$$

Остаточная намагниченность генератора моделируется блоком «источник напряжения» U. Кратковременное включение ключа K1 позволяет произвести самовозбуждение генератора. Одновременно с этим необходимым условием является наличие на выводах генератора конденсаторов возбуждения, что осуществляется блоком «трехфазный конденсатор» Cв. Включение электродвигателей тележек осуществляется ключами K2 и K3, при этом одновременно происходит включение дополнительных конденсаторов обеспечивающих компенсацию реактивных токов. Блок «асинхронный электродвигатель» M позволяет отслеживать параметры скорости вращения и электромагнитного момента. Фазные токи и напряжения контролируются измерительными блоками «амперметр» A и «вольтметр» V. Блок программирования PL позволяет задавать момент вращения генератора и моменты двигателей на валу согласно определенным функциям посредством сигналов управления u1, u2 и u3. Также данный блок производит включение двигательной нагрузки сигналами управления u4 и u5, которые подаются на ключи K2 и K3.



*Рисунок 2 - График изменения мгновенного значения выходного напряжения АГ во времени*

В ИКМ для блока «асинхронный генератор» были заданы параметры серийного АД мощностью 3 кВт и синхронной скоростью вращения 750 об/мин. После кратковременного включения источника (блок U) ключом K1 (момент времени 0,1 с на рисунке 2) появляется напряжение 10 В, а после его отключения происходит процесс самовозбуждения, емкость блока «конденсатор возбуждения» Cв при этом составляет 32 мкФ. Блок PL формирует отрицательный момент (-0,01·Мн), и происходит процесс самовозбуждения (момент времени 0,7 с на рисунке 2), который заканчивается установлением действующего значения напряжения на выводах генератора 380 В. Далее включением ключа K2 происходит наброс двигательной нагрузки (электродвигатель M1 тележки дождевальная машины мощностью 0,37 кВт и блок конденсаторов C<sub>ад1</sub> емкостью 2,5 мкФ), чему соответствует момент времени 2,2 с. на рисунке 2. При этом происходит размагничивание АГ и на рисунке 2 отчетливо виден переходный процесс в виде резкого падения действующего значения напряжения до 223 В за счет наличия пускового тока электродвигателя тележки и недостаточной стабилизации частоты вращения. Блок программирования PL поддерживает приводной момент генератора таким образом, чтобы выходное напряжение отклонялось в пределах  $\pm 10\%$  от номинального. Совершив передвижение тележки 1 происходит отключение питания (момент времени 3,2 с на рисунке 2), затем блок PL формирует управляющий сигнал на включение ключа K3 и включается электродвигатель M2 тележки мощностью 0,37 кВт и блок конденсаторов C<sub>ад2</sub> емкостью 2,5 мкФ (момент времени 4,2 с на рисунке 2). Происходит аналогичный запуск электродвигателя M2 тележки. Таким образом, дождевальная машина перемещается на определенный угол, который корректируется временем работы электроприводов тележек.

### **Заключение**

Полученная в программе SimInTech имитационная модель позволяет достаточно точно рассматривать переходные режимы асинхронного генератора, питающего электрооборудование дождевальная машины. К главным достоинствам ИКМ можно отнести наглядность, поскольку при всех переключениях в схеме обеспечивается возможность

наблюдения изменений параметров электрической энергии для всех её узлов, в частности асинхронного генератора. На схеме управления непосредственно отражены необходимые условия для его самовозбуждения. При постановке в имитационную модель вычисленных параметров конденсаторных батарей и мощности генератора наблюдается устойчивое электроснабжение тележек дождевальной машины. Однако напряжение на выводах асинхронного генератора падает до 354 В, что на 6,8 % меньше номинального. При этом дополнительно проведенные расчеты показывают, что напряжение должно составлять 380 В. Такую разницу можно интерпретировать как погрешность расчетов. Высокие пусковые токи приводят к резкому размагничиванию асинхронного генератора, поэтому перспективным направлением является автономное электроснабжение с использованием частотного преобразователя или устройства плавного пуска.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баракин, Н. С. Анализ электрооборудования мобильной почвенно-экологической лаборатории и его вероятной мощности / Н. С. Баракин, Е. Е. Баракина // Агротехника и энергообеспечение. – 2015. – № 1(5). – С. 85-95.
2. Структурный анализ сельскохозяйственных электротехнологических установок и выбор источников для их автономного электропитания / Н. И. Богатырев, А. С. Оськина, Я. А. Ильченко [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2009. – № 21. – С. 223-230.
3. Ванурин, В.Н. Стандартные и многофункциональные асинхронные электрические машины : Учебное издание / В. Н. Ванурин, Н. И. Богатырев, К. А. А. Джанибеков, В. И. Пахомов. – Зерноград: ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 2010. – 148 с.
4. Патент № 2332779 С1 Российская Федерация, МПК H02P 9/46, H02J 3/18. Автономный источник электрической энергии : № 2007120542/09 : заявл. 01.06.2007 : опубл. 27.08.2008 / Н. И. Богатырев, В. Н. Ванурин, Я. А. Ильченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кубанский государственный аграрный университет.
5. Богатырев, Н. И. Статорные обмотки и параметры асинхронных двигателей и генераторов / Н. И. Богатырев, В. Н. Ванурин, О. В. Вронский. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2013. – 352 с.
6. Бакиров, С. М. Разработка устройства динамической компенсации реактивной мощности электродвигателей, используемых в составе электроприводов секций дождевальной машины / С. М. Бакиров // Вестник аграрной науки Дона. – 2020. – № 3 (51). – С. 77–85.
7. Бакиров, С. М. Анализ энергозатрат на дождевальную машину / С. М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 10. – С. 95-98. – DOI 10.28983/asj.y2019i10pp95-98.
8. Иванов, А.А. Асинхронные генераторы для гидроэлектрических станций небольшой мощности / А.А. Иванов. - М.- Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 125 с.
9. Торопцев, Н.Д. Электрические машины сельскохозяйственного назначения [Текст] / Н.Д. Торопцев. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 215 с.
10. Калачев, Ю.Н. Моделирование в электроприводе. – М. : ДМКПресс, 2021. – 106 с. ил.

### Баракин Николай Сергеевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», г. Краснодар  
Кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и электропривода, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13  
Тел. (861) 221-59-02  
E-mail: barakin85@mail.ru

### Стрижков Игорь Григорьевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», г. Краснодар  
Доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электропривода, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13  
Тел. (861) 221-59-02  
E-mail: strizhkov.i.g@gmail.com

### Волошин Александр Петрович

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина», г. Краснодар  
Кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и электропривода, 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13  
Тел. (861) 221-59-02  
E-mail: akubsau@mail.ru

### Коренков Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8(4862)41-98-30  
E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

BARAKIN N.S., STRIZHKOV I.G., VOLOSHIN A.S., KORENKOV D.A.

## SIMULATION MODELING OF SPRINKLER MACHINE POWER SUPPLY IN SIMINTECH

**Abstract.** *The article analyzes the autonomous generators used for power supply of electrical equipment in agriculture. A promising direction is the use of an asynchronous generator as part of an autonomous source, since it has a contactless excitation system and increased operational characteristics. The distribution of the excitation capacitor along the power supply line allows local compensation of reactive power. In the case of using an asynchronous generator for power supply of electrical equipment (gear electric drive of trolleys) circular sprinkler machines will reduce technical losses in the power supply line, since the line has a long length, which can reach 1000 m. The calculation of the required power of the generator based on the serial electric motor of the AIR series and the necessary capacitances of capacitor banks to excite the generator and reduce the demagnetizing effect of the load current is given. The analytical calculation was verified using a developed computer model simulating the power supply of electrical equipment of a circular motion sprinkler machine performed in the SimInTech program.*

**Keywords:** *Simulation model, sprinkler machine, SimInTech program.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Barakin, N. S. Analysis of electrical equipment of a mobile soil-ecological laboratory and its probable capacity / N. S. Barakin, E. E. Barakina // Agrotechnics and energy supply. – 2015. – № 1(5). – P. 85-95.
2. Structural analysis of agricultural electrotechnological installations and selection of sources for their autonomous power supply / N. I. Bogatyrev, A. S. Oskina, I. A. Ilchenko [and others.] // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. – 2009. – № 21. – P. 223-230.
3. Vanurin, V. N. Standard and multifunctional asynchronous electric machines : Educational edition / In. N. Vanurin, N. I. Bogatyrev, K. A. A. Dzhaniybekov, V. I. Pakhomov. Zernograd: GNU SKNIIMESH of the Russian Agricultural Academy, 2010. – 148 P.
4. The patent № 2332779 C1 Russian Federation, IPC H02P 9/46, H02J 3/18. Autonomous electric power source: No. 2007120542/09: application. 01.06.2007 : publ. 27.08.2008 / N. I. Bogatyrev, V. N. Vanurin, I. A. Ilchenko [and others]; applicant Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Kuban State Agrarian University.
5. Bogatyrev, N. I. Stator windings and parameters of asynchronous motors and generators. Vanurin, O. V. Vronsky. Krasnodar: I.T Kuban State Agrarian University. Trubilina Publ., 2013. – 352 P.
6. Bakirov, S. M. Development of a device for dynamic compensation of reactive power of electric motors, used as part of the electric drives of the sprinkler machine sections / S. M. Bakirov // Vestnik agrarnoi nauki Dona. – 2020. – № 3 (51). – P. 77-85.
7. Bakirov, S. M. Analysis of energy consumption for a sprinkler machine / S. M. Bakirov // Agrarian Scientific Journal. – 2019. – № 10. – P. 95-98. – DOI 10.28983/asj.y2019i10pp95-98.
8. Ivanov, A.A. Asynchronous generators for small-capacity hydroelectric power stations / A.A. Ivanov. – M. – L.: Gosenergoizdat, 1948. – 125 P.
9. Toroptsev, N. D. Electric agricultural machines / N.D. Toroptsev. – Moscow: Energoatomizdat Publ., 2005. – 215 P.
10. Kalachev, Yu. N. Modeling in an electric drive. – M.: DMKPress, 2021. – 106 P.

#### **Nikolai Sergeevich Barakin**

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin,  
Krasnodar  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the  
Department of Electric Machines and Electric Drive, 13  
Kalinina str., Krasnodar, 350044  
Ph. (861) 221-59-02  
E-mail: barakin85@mail.ru

#### **Voloshin Alexander Petrovich**

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin,  
Krasnodar  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the  
Department of Electric Machines and Electric Drive, 13  
Kalinina str., Krasnodar, 350044  
Ph. (861) 221-59-02  
E-mail: akubsau@mail.ru

#### **Strizhkov Igor Grigorievich**

Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin,  
Krasnodar  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department of Electric Machines and Electric Drive, 13  
Kalinina str., Krasnodar, 350044  
Ph. (861) 221-59-02  
E-mail: strizhkov.i.g@gmail.com

#### **Korenkov Dmitry Andreevich**

Orel state university of I.S. Turgenev, Orel  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of  
the Department of Electrical Equipment and Energy  
Saving  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
Ph. 8(4862)41-98-30  
E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

БАРЫШЕВА Н.Н., БАРЫШЕВ Д.Д., МУЗОВАТОВА Я.Ю.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН

**Аннотация.** В работе представлен альтернативный подход к решению задачи оценки эффективности послеуборочной обработки семян с применением интеллектуальных технологий. Установлено, что в основе методики оценки качества фракционных технологий, зерноочистительных машин и технологических линий могут быть использованы результаты исследования биоэлектрических показателей семян пшеницы, разделенных на фракции, как дополнительных показателей посевной пригодности и индикаторов травмированных и поврежденных семян. По результатам исследования зафиксировано, что метод «Дерево решений» позволяет выполнить классификацию данных с точностью в 96%, результаты классификации могут быть использованы для оценки качества фракционных технологий по критерию оценки принадлежности семян к той или иной фракции.

**Ключевые слова:** послеуборочная обработка семян, фракционирование, оценка качества, биоэлектрические сигналы, интеллектуальные технологии.

### Введение

Производство высококачественного семенного материала представляет приоритетную задачу как для отдельных регионов, так и в целом для Российской Федерации. Качество семенного материала зависит от многочисленных факторов - климатических условий, технологий возделывания и уборки семян, способов послеуборочной обработки семян, степени травмирования зерен, количественных и качественных показателей полученного материала [1-5].

Послеуборочная обработка семян пшеницы представляет собой обязательный технологический процесс, который включает предварительную и первичную очистку семян от трудноотделимых примесей, сушку семян, вторичную очистку и сортировку на фракции.

Исследования авторов показали, что в процессе послеуборочной обработки наиболее вероятно повреждение семян о рабочие и транспортирующие элементы производственных линий, что влечет за собой снижение качества семенного материала, снижение урожайности [4]. Установлено, что семяочистительные линии травмируют до 17 % семян из зернового вороха [1]. Именно поэтому множество работ посвящено разработке конструкций семяочистительных машин, повышению их надежности, производительности и других технических характеристик, учитывая вопросы поточных технологий [4, 6-8]. Несмотря на все многообразие работ, остается актуальным вопрос контроля качества работы как отдельных семяочистительных машин, так и использование поточных фракционных технологий подготовки семян. Фракционирование зерна пшеницы относится к комплексу популярных ресурсосберегающих мероприятий, поскольку позволяет отсортировать высококачественные семена из массы, пригодные для посева, тем самым повышая урожайность.

Вопрос контроля качества фракционных технологий может быть эффективно решен с помощью применения методов оценки качества зерна по биоэлектрическим потенциалам после его сортировки с использованием интеллектуальных технологий для обработки данных. На сегодняшний день такие методы как нейронные сети и деревья решений набирают популярность для решения задач классификации и прогнозирования в агропромышленном комплексе [9-12].

Таким образом, оценка эффективности послеуборочной обработки семян позволит не только осуществлять выбор фракционных технологий, но и выполнять отбор пригодных для посева семян для повышения урожайности и потребительских характеристик зерна.

В связи с этим, целью настоящего исследования является разработка способа оценки качества фракционных технологий, основываясь на методе исследования биоэлектрических показателей зерна и методов машинного обучения и нейронных сетей для обработки и анализа данных.

Задачи исследования:

- подготовить семенной материал для оценки качественных показателей по биоэлектрическим потенциалам;

- построить модель для оценки качества семенного материала после применения фракционных технологий на основе результатов измерения биоэлектрических потенциалов зерна пшеницы, разделенных на фракции;

- выполнить анализ значимости каждого фактора модели;
- выполнить тестирование на практике.

### **Материалы и методы**

Для оценки качества зерна выбран альтернативный метод, основанный на исследовании биоэлектрических потенциалов [13].

В исследованиях были использованы результаты измерения биоэлектрических потенциалов семян пшеницы разных сортов – «Тасос», «Гранни», «Алтайская-75», «Калиско».

Семена представлены разными фермерскими хозяйствами Алтайского края Сибирского округа Российской Федерации. Для построения модели использовались данные за 2019, 2020 год, для практической апробации и тестирования системы использовались данные за 2023 год.

#### *Метод отбора и сортировки семян для эксперимента*

Для исследования выбрано разделение по аэродинамическим признакам с использованием пневмосепаратора «Петкус К293». Зерноочистительная машина позволяет выполнить сортировку семян на несколько фракций по скорости витания, в каждой партии было получено не менее 4-х фракций от 8 м/с до 11 м/с с шагом в 1 м/с, для сорта «Калиско» получено 5 фракций.

Отбор проб из сортированного зерна для исследования проводился в соответствии с ГОСТ 12036-85. В каждом образце отобрано по 100 семян для измерения биоэлектрических потенциалов.

#### *Метод измерения биоэлектрических потенциалов*

Метод измерения биоэлектрических потенциалов включает подготовку семян к исследованию, измерение и обработку данных. Подготовка представляет проращивание семян в термокамере в дистиллированной воде при температуре 20 градусов в течение 12 часов [13, 14].

По истечении времени каждое зерно из анализируемой пробы помещается в электрод-держатель, оболочка зерна прокалывается электродом-иглой в область зародыша, с помощью АЦП записывается сигнал в течение 5 секунд. В результате измерений получен массив данных с каждого зерна, который может быть использован для оценки качества разделения семян на фракции.

#### *Применение интеллектуальных технологий*

Выбор интеллектуальных технологий представляет важный вопрос и основан на результатах практического сравнительного анализа, поскольку существует большое количество разнообразных методов, которые отличаются определенными особенностями, областью использования, преимуществами и недостатками.

В данном исследовании представлены результаты сравнительного анализа нейронных сетей и одного из наиболее популярных методов классификации - дерева решений.

При решении задачи оценки эффективности фракционных технологий вычислительные эксперименты проводились на нейронных сетях с одним и двумя скрытыми слоями, общее количество нейронов варьировалось от 2 до 20. Метод обучения сетей тот же – метод обратного распространения ошибки.

### **Результаты и обсуждения**

Сортировка семян представляет один из эффективных способов повышения урожайности, так как позволяет выделить наиболее ценные семена с высоким посевным потенциалом. Установлено, что семена пшеницы из разных фракций характеризуются разным качеством, зафиксированы разные показатели [15], поэтому выбран альтернативный метод оценки качества по биоэлектрическим потенциалам [13, 14] для получения данных с целью разработки способа оценки эффективности фракционных технологий.

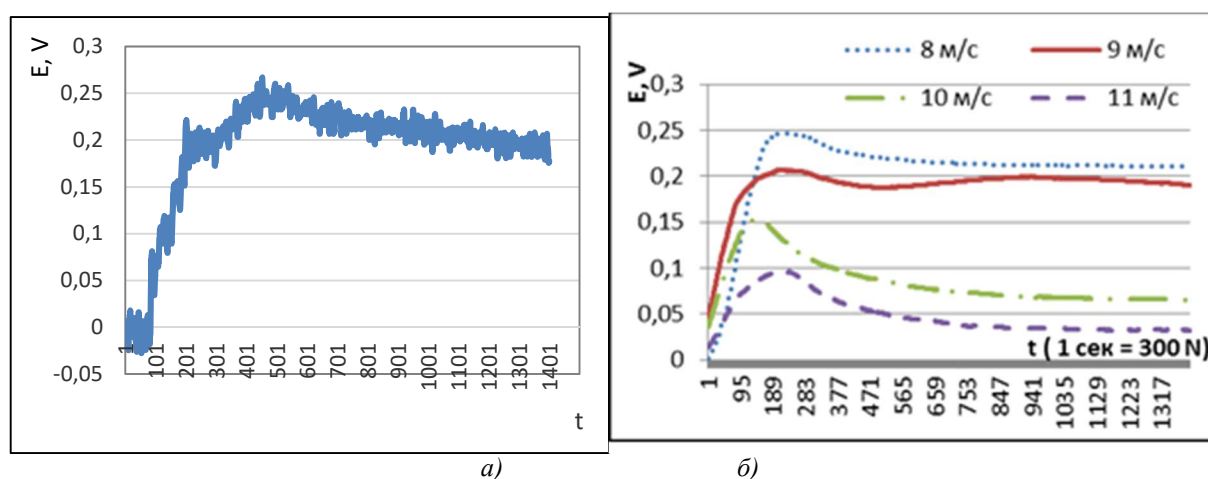
Применение интеллектуальных технологий предусматривает выполнение следующих этапов – подготовку исходных данных, формирование модели, а в случае применения нейросетевых технологий – формирование нейронной сети, предварительное обучение, анализ результатов, оценка точностных характеристик, интерпретация результата для оценки

эффективности фракционных технологий и зерноочистительных машин. Рассмотрим каждый из этапов решения поставленных задач классификации.

#### *Анализ результатов измерения и подготовка данных для анализа*

В результате применения фракционных технологий получено не менее четырех фракций семян пшеницы с разными посевными показателями, что подтверждено после измерения биоэлектрических потенциалов. Установлено, что каждая фракция семян характеризуется разными сигналами.

Зафиксированные сигналы представляют аддитивную смесь «сигнал + шум». Выявлено, что на полезный сигнал накладываются шум квантования и высокочастотная гармоническая помеха, поэтому для предварительной обработки сигналов использовался метод скользящего среднего. На рисунке 1а представлены данные до обработки, на рисунке 1б приведены сигналы четырех разных фракций семян пшеницы сорта «Гранни» после предварительной обработки методом скользящего среднего.



**Рисунок 1 - Графики сигналов семян пшеницы сорта «Гранни»:** а) сигналы до обработки; б) сигналы после обработки четырех фракций с аэродинамическими свойствами 8, 9, 10, 11 м/с

Анализ сигналов семян пшеницы одной пробы из одной фракции показал, формы сигналов отличаются на одном и том же временном интервале, поэтому принято решение использовать отдельные информативные точки на графиках для анализа данных интеллектуальными инструментами.

На рисунке 2 представлены выборочно сигналы для одной фракции семян сорта «Тасос». В качестве информативных точек принято решение использовать 4 точки: T-Line, T-MaxMP, T-10%, MaxMP.

#### *Результаты анализа значимости факторов*

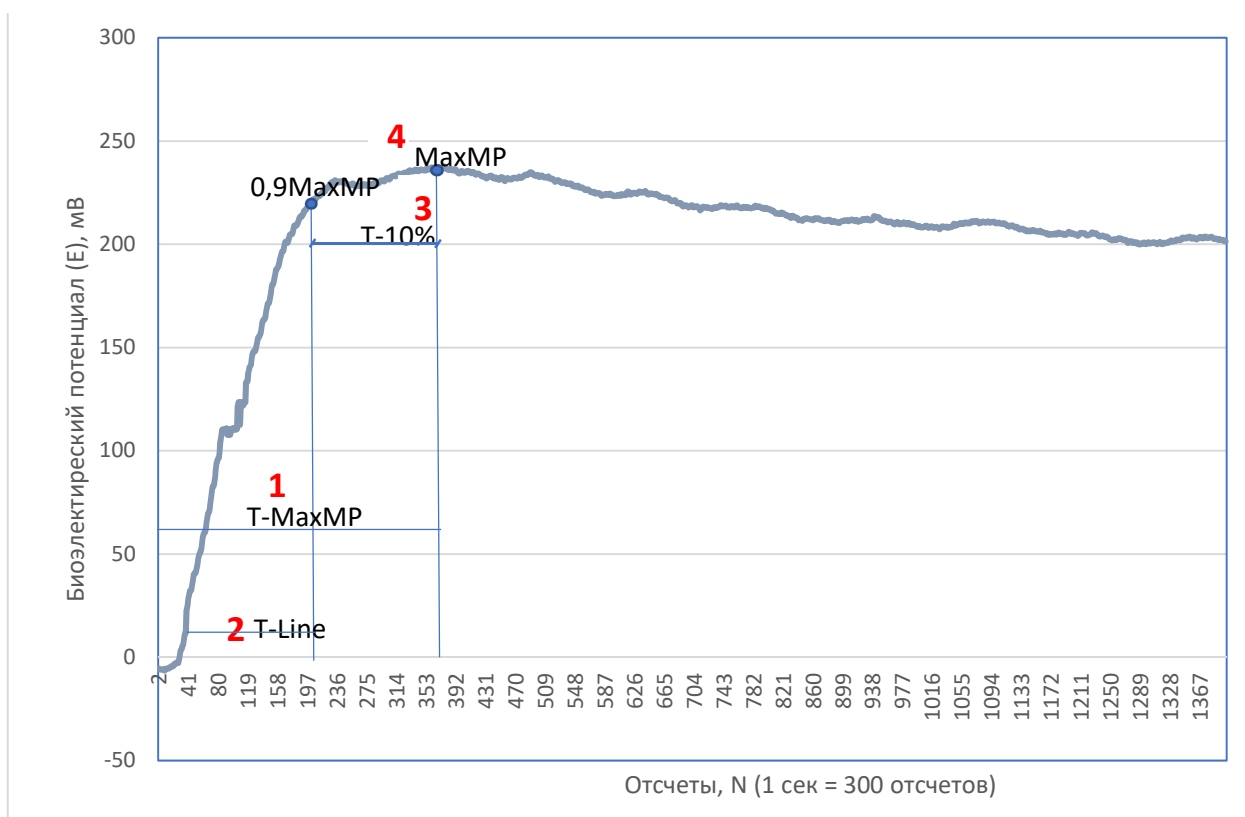
Для анализа значимости выбранных факторов (информативных точек) выполнен корреляционный анализ.

Качество обучающей выборки определяется выбором тех информативных точек, которые коррелируют с целевой функцией, но не коррелируют друг с другом в своем подмножестве. Целевая функция – аэродинамические свойства 8, 9, 10, 11 м/с.

В таблице 1 представлены результаты корреляционного анализа.

**Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа обучающей выборки данных**

	T-MaxMP	T-Line	MaxMP	T-10%	Y
T-MaxMP	1				
T-Line	0,60	1			
MaxMP	-0,44	-0,18	1		
T-10%	0,56	0,59	-0,53	1	
Y	0,92	0,67	-0,64	0,98	1



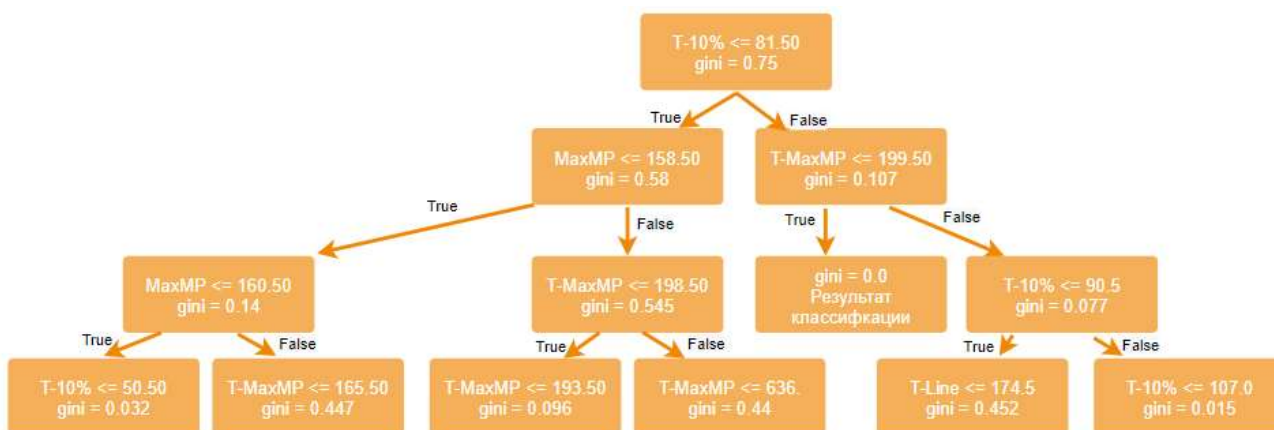
**Рисунок 2 - Информативные точки на графике:** 1 - T-MaxMP (время изменения сигнала до максимума), 2 - T-Line (время изменения сигнала на прямолинейном участке до максимума), 3 - T-10% (изменение сигнала в области максимума), 4 - MaxMP (максимальное значение)

В результате анализа установлены высокие коэффициенты корреляции с целевой функцией для параметров T-Line, T-MaxMP, T-10%, MaxMP в диапазоне от 0,64 до 0,98 и низкие значения корреляции друг с другом (от 0,18 до 0,59), что в совокупности подтверждает информативность выбранных точек.

#### Применение метода «дерево решений» для классификации данных

Для классификации данных по четырем информативным точкам выбран метод «Дерево решений». Экспериментальным путем установлена оптимальная глубина – 4 уровня. Обучающая и тестовая выборки разделены на две группы в соотношении 70 на 30.

В результате оценки качества классификации установлено, что точность составила 96,4%. В каждом эксперименте для определенного сорта участвовало по 400 примеров с каждой фракции. По завершению вычислительных операций установлено максимальное количество ошибок определения принадлежности данных к фракции 11 м/с, принадлежность данных к фракциям 8 и 9 м/с определены практически с точностью в 100%.



**Рисунок 3 - Алгоритм классификации методом «Дерево решений» для оценки качества фракционных технологий**

*Применение нейросетевых технологий для оценки качества фракционных технологий*

Для решения задачи классификации по фракциям принято решение сократить количество входных узлов, ввести дополнительный признак «Сорт»:

1. MaxMP - максимальное значение сигнала.
2. T-10% - изменение сигнала в области максимума (10 % от максимума).
3. Сорт.

Выходные данные – аэродинамические свойства 8, 9, 10, 11 м/с.

Все данные были поделены случайным образом на два подмножества: обучающие примеры и тестовые примеры. Соотношение между численностью примеров в первом и во втором подмножестве составляло 80 на 20. Соответственно на обучающем подмножестве нейронные сети обучались, на тестовом подмножестве проходило их тестирование, на основе результатов которого делались выводы и оценивалась адекватность всей модели.

Таблица 2 – Фрагмент обучающей выборки

Максимальное значение, мВ	Время изменения сигнала, N	Сорт семян пшеницы	Значение скорости разделения на фракцию
235,00	88	Гранни	8
206,00	57	Тасос	8
158,00	149	Тасос	9
162,00	133	Алтайский-75	9
234,00	6	Алтайский-75	10
265,00	23	Калиско	11
133,00	19	Гранни	11

Для реализации нейронной сети сорт семян пшеницы был закодирован с использованием метода 1-из-N.

Количество нейронов на выходном слое - 1. Тип нейронной сети – многослойный персептрон. Сети обучались с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Количество скрытых слоев и количество нейронов подбирались экспериментально.

Минимальная ошибка была зафиксирована при использовании двух скрытых слоев по 5 и по 10 нейронов (рисунок 4а).

Исследования показали, что сорт семян пшеницы является необходимым информативным признаком (рисунок 4,б). Его исключение ведет к снижению доли правильного распознавания примеров в тестовой выборке.

Установлено, что нейросеть позволяет выполнить оценку эффективности фракционных технологий с точностью в 90 %.

### **Заключение**

В данной работе представлены результаты применения интеллектуальных технологий для оценки качества послеуборочной обработки на примере оценки эффективности фракционных технологий с помощью метода машинного обучения «Дерево решений» и нейросетевых технологий.

В качестве входных данных для реализации моделей выбраны информативные точки на графиках биоэлектрических сигналов семян пшеницы разных фракций и разных сортов.

Преимуществом использования метода контроля биоэлектрических потенциалов для оценки качества семян пшеницы является тот факт, что метод позволяет получить в сжатые сроки достоверные данные о посевных качествах с учетом наличия травмированных и щуплых семян.

Сравнительный анализ двух разных технологий для классификации данных показал, что метод «Дерево решений» дает более точные результаты, при этом нет необходимости использовать «Сорт» как информативный признак. Нейронная сеть же показала, что данный информативный признак обязателен.

Таким образом, оценка качества фракционирования семян пшеницы разных сортов по биоэлектрическим потенциалам показала высокое качество разделения семян на фракции пневмосепаратором.



а)



б)

Рисунок 4 – Оценка принадлежности семян к определенной фракции

а) Определение наилучших параметров структуры нейросети; б) Результаты обучения нейронной сети

Установлено, что доля семян из первой фракции 8 м/с составила 92 % семян, отсортированных при скорости 8 м/с, доля семян из второй фракции 9 м/с – 96 % семян, отсортированных при скорости 9 м/с, третья фракция 10 м/с – 99%, отсортированных при скорости 10 м/с, четвертая фракция 11 м/с – 97 %, отсортированных при скорости 11 м/с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orobinsky, V. I., Gulevsky, V. A., Chernyshov, A. V. Improving the technology of post-harvest seed treatment / V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.V. Chernyshov; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. - Vol. 723.
2. Tarasenko, A. P., Chernyshov, A. V., Kurilov, D. O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A.P. Tarasenko, A. V. Chernyshov, D.O. Kurilov; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. - Vol. 327.

3. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov, E. Dick, S. Arslanbekova // J. of Applied Engineering Sci. – 2019. - Vol. 17(4). - P. 529-534.
4. Tishaninov, N. P. Modernization of imported grain cleaning technologies / N.P. Tishaninov // Science in central Russia. – 2019. - Vol. 4. - P. 12-18.
5. Belyaev, V. I., Sokolova, L. V., Matsyura, A. V. Assessment of agro-climatic potential in agricultural areas in the vicinities of Nur-sultan (Kazakhstan), Barnaul (Russia, Altai krai) and Novokuznetsk (Russia, Kemerovskaya oblast) / V. I. Belyaev, L. V. Sokolova, A. V. Matsyura // Ukrainian Journal of Ecology. – 2020. - T. 10. - Vol. 3. - P. 221-224.
6. The Effect of Selected Factors on Separation Efficiency in a Pneumatic Conical Separator / D.J. Choszcz, P.S. Reszczyński; E. Kolankowska, S. Konopka, A. Lipiński // Sustainability. – 2020. - Vol. 12.
7. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A.M. Giyevskiy, V.I. Orobinsky, A.P. Tarasenko, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. - Vol. 327.
8. Design and construction of a pneumatic harvesting and cleaning machine for jojoba seeds / Mahmoud A. El-Emam, Saad Fathallah Ahmed, Mohamed Ahmed Sabah, Soliman Nasif, Weidong Shi, Ling Zhou // Engineering in Agriculture, Environment and Food. – 2019. - Vol. 12. - Issue 4. - P. 451-459.
9. Application of technologies of artificial intelligence in agriculture / E.A. Skvortsov, V.I. Nabokov, K.V. Nekrasov, E.G. Skvortsova, M.I. Krotov // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2019. - Vol. 8. – P. 187.
10. Machine learning methods for anomaly classification in wastewater treatment plants / Francesca Bellamoli, Mattia Di Iorio, Marco Vian, Farid Melgani // Journal of Environmental Management. – 2023. - Vol. 344. - <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118594>.
11. A comparison of support vector machines, artificial neural network and classification tree for identifying soil texture classes in southwest / China Wei Wu, Ai-Di Li, Xin-Hua He, RanMa, Hong-Bin Liu, Jia-Ke Lv. // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. - Vol. 144. - P. 86-93.
12. Predicting Agriculture Yields Based on Machine Learning Using Regression and Deep Learning / P. Sharma, P. Dadheech, N. Aneja and S. Aneja // IEEE Access. 2023. - Vol. 11.
13. Barysheva, N. N., Pronin, S. P. Method of determining seed germination by using membrane potential of wheat seeds / N.N. Barysheva, S.P. Pronin // Engineering Technologies and Systems. – 2019. - Vol. 29. - No. 3. - P. 443-455.
14. Comparison of machine learning methods for solving the problem of wheat seeds classification by yield properties / D.D. Baryshev, N.N. Barysheva, S.P. Pronin, O.K. Nikolskii // Russian Agricultural Sciences. – 2020. - Vol. 46 (4). - P. 410-417.
15. Pasyunkova E.N., Zavalin A.A., Pasyunkov A.V. Change in Quality Parameters of Hulled Oats Grain at Fractionation / E.N. Pasyunkova, A.A. Zavalin, A.V. Pasyunkov // Russian Agricultural Sciences. – 2028. - Vol. 8. - P. 409 - 413.

**Барышева Надежда Николаевна**  
ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»,  
г. Барнаул  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Информационные системы в  
экономике»  
656038, Алтайский край, г.  
Барнаул, проспект Ленина, д. 46  
Тел. +7 923 647 34-43  
E-mail: mnn-t@mail.ru

**Барышев Денис Дмитриевич**  
ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»,  
г. Барнаул  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Информационные системы в  
экономике»  
656038, Алтайский край, г.  
Барнаул, проспект Ленина, д. 46  
Тел. +7 923 648 88-50  
E-mail: denis.baryshev@bk.ru

**Музоватова Яна Юрьевна**  
ФГБОУ ВО «Алтайский  
государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»,  
г. Барнаул  
Аспирант, преподаватель кафедры  
«Информационные системы в  
экономике»  
656038, Алтайский край, г.  
Барнаул, проспект Ленина, д. 46  
Тел. +7 905 927-20-42  
E-mail: yana.muzovatova@mail.ru

BARYSHEVA N.N., BARYSHEV D.D., MUZOVATOVA Y.YU.

## APPLICATION OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES TO ASSESS THE POST-HARVEST SEED TREATMENT EFFECTIVENESS

**Abstract.** *The paper presents an alternative solving the problem of assessing the post-harvest seed treatment effectiveness by using intelligent technologies. It was established that the methodology for assessing the quality of fractional technologies, grain cleaning machines and technological lines can be based on the results of the study of bioelectric parameters of wheat seeds, divided into fractions. Bioelectric parameters may be used as additional indicators of sowing suitability and indicators of damaged seed. According to the results of the study, it was recorded that the decision tree method allows the classification of data with an accuracy of 96%. The classification results can be used to assess the quality of fractional technologies according to the criterion for assessing the seeds belonging to a particular fraction.*

**Keywords:** *post-harvest seed treatment, fractionation, quality assessment, bioelectric signals, intelligent technologies*

## BIBLIOGRAPHY

1. Orobinsky, V. I., Gulevsky, V. A., Chernyshov, A. V. Improving the technology of post-harvest seed treatment / V.I. Orobinsky, V.A. Gulevsky, A.V. Chernyshov; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. - Vol. 723.
2. Tarasenko, A. P., Chernyshov, A. V., Kurilov, D. O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A.P. Tarasenko, A. V. Chernyshov, D.O. Kurilov; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. - Vol. 327.
3. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov, E. Dick, S. Arslanbekova // J. of Applied Engineering Sci. – 2019. - Vol. 17(4). - P. 529-534.
4. Tishaninov, N. P. Modernization of imported grain cleaning technologies / N.P. Tishaninov // Science in central Russia. – 2019. - Vol. 4. - P. 12-18.
5. Belyaev, V. I., Sokolova, L. V., Matsyura, A. V. Assessment of agro-climatic potential in agricultural areas in the vicinities of Nur-sultan (Kazakhstan), Barnaul (Russia, Altai krai) and Novokuznetsk (Russia, Kemerovskaya oblast) / V. I. Belyaev, L. V. Sokolova, A. V. Matsyura // Ukrainian Journal of Ecology. – 2020. - T. 10. - Vol. 3. - P. 221-224.
6. The Effect of Selected Factors on Separation Efficiency in a Pneumatic Conical Separator / D.J. Choszcz, P.S. Reszczyński; E. Kolankowska, S. Konopka, A. Lipiński // Sustainability. – 2020. - Vol. 12.
7. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A.M. Giyevskiy, V.I. Orobinsky, A.P. Tarasenko, A.V. Chernyshov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. - Vol. 327.
8. Design and construction of a pneumatic harvesting and cleaning machine for jojoba seeds / Mahmoud A. El-Emam, Saad Fathallah Ahmed, Mohamed Ahmed Sabah, Soliman Nasif, Weidong Shi, Ling Zhou // Engineering in Agriculture, Environment and Food. – 2019. - Vol. 12. - Issue 4. - P. 451-459.
9. Application of technologies of artificial intelligence in agriculture / E.A. Skvortsov, V.I. Nabokov, K.V. Nekrasov, E.G. Skvortsova, M.I. Krotov // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2019. - Vol. 8. – P. 187.
10. Machine learning methods for anomaly classification in wastewater treatment plants / Francesca Bellamoli, Mattia Di Iorio, Marco Vian, Farid Melgani // Journal of Environmental Management. – 2023. - Vol. 344. - <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118594>.
11. A comparison of support vector machines, artificial neural network and classification tree for identifying soil texture classes in southwest / China Wei Wu, Ai-Di Li, Xin-Hua He, RanMa, Hong-Bin Liu, Jia-Ke Lv. // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. - Vol. 144. - P. 86-93.
12. Predicting Agriculture Yields Based on Machine Learning Using Regression and Deep Learning / P. Sharma, P. Dadheech, N. Aneja and S. Aneja // IEEE Access. 2023. - Vol. 11.
13. Barysheva, N. N., Pronin, S. P. Method of determining seed germination by using membrane potential of wheat seeds / N.N. Barysheva, S.P. Pronin // Engineering Technologies and Systems. – 2019. - Vol. 29. - No. 3. - P. 443-455.
14. Comparison of machine learning methods for solving the problem of wheat seeds classification by yield properties / D.D. Baryshev, N.N. Barysheva, S.P. Pronin, O.K. Nikolskii // Russian Agricultural Sciences. – 2020. - Vol. 46 (4). - P. 410-417.
15. Pasynkova E.N., Zavalin A.A., Pasynkov A.V. Change in Quality Parameters of Hulled Oats Grain at Fractionation / E.N. Pasynkova, A.A. Zavalin, A.V. Pasynkov // Russian Agricultural Sciences. – 2028. - Vol. 8. - P. 409 - 413.

**Barysheva Nadezhda Nikolaevna**  
 Department of informatic systems in  
 economics, Polzunov Altai State  
 Technical University,  
 Russia, Altay region, Barnaul,  
 prospect Lenina 46, Barnaul 656038,  
 Russian Federation  
 Tel. +7 923 647 34-43  
 E-mail: mnn-t@mail.ru

**Baryshev Denis Dmitrievich**  
 Department of informatic systems in  
 economics, Polzunov Altai State  
 Technical University,  
 Russia, Altay region, Barnaul,  
 prospect Lenina 46, Barnaul 656038,  
 Russian Federation  
 Tel. +7 923 648 88-50  
 E-mail: denis.baryshev@bk.ru

**Muzovatova Yana Yurievna**  
 Department of informatic systems in  
 economics, Polzunov Altai State  
 Technical University,  
 Russia, Altay region, Barnaul,  
 prospect Lenina 46, Barnaul 656038,  
 Russian Federation  
 Tel. +7 905 927-20-42  
 E-mail: yana.muzovatova@mail.ru

© Барышева Н.Н., Барышев Д.Д., Музоватова Я.Ю., 2025

ГАРАНИН М.Е., ФЕДЯНИН В.Я.

## ОБРАБОТКА МАССИВА ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЛНЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ЗЕМЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СИСТЕМ

**Аннотация.** Исследование процессов распространения температурных волн в приповерхностных слоях почвы позволяет оптимизировать параметры грунтовых теплообменников, поставляющих низкопотенциальное тепло в испаритель теплового насоса, что в свою очередь повышает устойчивость системы и предотвращает избыточное расходование запасаемой тепловой энергии в приповерхностных слоях Земли. Распределение температуры многослойного грунта представляет собой сложную задачу, в которой учитываются климатические условия, геологические свойства грунта, геометрия многослойного грунта и тепловые потоки. Анализ массива данных температурных волн в почве позволяет аналитически производить прогноз в зависимости от погодных условий и интенсивности воздействия солнечной радиации на поверхность земли. В статье представлена методика для расчета распределения температурной волны для почвы, состоящей из двух и более слоев, имеющих различные теплофизические параметры. На основании данных метеослужб и данных с вытяжных термометров были построены графики распределения температур в почве и приведена методика определения амплитудного коэффициента.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, температурные волны, теплонасосные системы отопления, эффективное использование низкопотенциального тепла поверхностных слоев Земли.

### Введение

Тепловые насосы (ТН) – устройства, предназначенные для переноса тепла от одного объекта другому, используя в качестве исходного объекта природные источники тепла, такие как воздух, грунт или вода. Принцип работы ТН основан на циклическом преобразовании агрегатного состояния хладагента в замкнутом корпусе. В ходе этого процесса хладагент поглощает тепло из окружающей среды, сжимается, повышает свою температуру и передает свое тепло в систему отопления или кондиционирования. [4]

Геотермальные тепловые насосы используют циклично накапливаемое тепло солнечной радиации в приповерхностных слоях Земли и тепловую энергию, поступающую из недр Земли. Использование тепловой энергии недр Земли имеет ряд недостатков, в особенности таких как бурение глубоких скважин, сложность в обслуживании и проблемы с долгосрочной устойчивостью. В отличие от постоянно накапливаемой тепловой энергии солнечной радиации в приповерхностных слоях Земли, энергия недр Земли может терять свою эффективность со временем, в особенности, если производится эксплуатация ТН без должного контроля.

Реализация потенциала накапливаемого тепла солнечной радиации в приповерхностных слоях Земли требует детального изучения. Температура приповерхностных слоев Земли зависит от сезонных колебаний, что усложняет моделирование и прогнозирование температурных изменений. Чтобы точно контролировать и прогнозировать тепловые изменения, необходимо использовать сложные математические модели, которые учитывают множество факторов: теплопередачу в грунте, температурные колебания на поверхности, глубину залегания теплообменников и тип почвы. Анализ массива данных и разработка модели будет производиться в данной статье. [1, 5]

### Основная часть

Тепловой режим почвы (ТРП) представляет собой совокупность процессов, связанных с поглощением, распределением и передачей тепла в почве. ТРП включает как сезонные колебания температуры, так и более длительные изменения, такие как климатические условия, характеристики, состав и глубины залегания почвы. Почва имеет следующие теплофизические параметры: теплопроводность почвы ( $\lambda$ ) (Вт/м·К), теплоемкость почвы ( $C$ ) (Дж/кг·К), плотность почвы ( $\rho$ ) (кг/м<sup>3</sup>). [2, 3]

Распределение тепла в почве определяется законами теплопередачи:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

где  $T(x, t)$  – температура почвы в точке с координатой  $(x)$  (глубина) в момент времени  $(t)$ ;  
 $t$  – время;  
 $x$  – глубина почвы (или расстояние от поверхности);  
 $\alpha$  – коэффициент теплопроводности почвы ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  
 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  – вторая производная температуры по глубине, которая представляет собой теплопередачу через почву.

Формула нахождения коэффициента теплопроводности почвы включает в себя ранее упомянутые теплофизические параметры: [6]

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

Передача тепла из одной среды в другую с разными теплофизическими параметрами задается граничными условиями. На поверхности почвы температура изменяется с течением времени под воздействием атмосферы и солнечной радиации. В простейших случаях процесс теплообмена можно записать следующим уравнением: [6]

$$T(0, t) = T_{\text{воздуха}}(t) \quad (3)$$

По мере продвижения в глубь почвы изменение теплофизических свойств слоев грунта будет задаваться следующим уравнением:

$$T_n(x, t) = T_{n+1}(x, t) \quad (4)$$

Процесс нахождения температуры однородной и изотропной почвы можно осуществить путем моделирования, прибегая к методу конечных элементов или конечных разностей. Аналитически мы можем получить приблизительное значение по следующей формуле: [7,8]

$$T(x, t) = T_0 + \Delta T \cdot e^{\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha^2}}\right) \cdot x} \cdot \cos\left(\omega t - x \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \alpha^2}}\right) \quad (5)$$

где  $\Delta T$  – амплитуда температурных колебаний на глубине  $x$ ;  
 $T_0$  – средняя температура почвы;  
 $T_{\text{per}}$  – период изменения температуры;  
 $\omega$  – круговая частота, соответствующая годовому периоду колебаний.

$$\omega = \frac{2\pi}{365 \cdot 24 \cdot 3600} = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ рад/с.} \quad (6)$$

Однако в реальных условиях исследуемый массив почвы будет состоять из нескольких слоев грунта, имеющих различные теплофизические параметры. В таком случае картина изменения температуры в многослойной почве будет иметь ряд условий: решение уравнения обособленно для каждого слоя почвы невозможно; при переходе из одного слоя в другой должно соблюдаться условие граничного теплообмена. [9]

На рисунке 1 представлена схема расположения теплообменника в многослойной почве.

Рассмотрим изменение амплитуды температурных колебаний для первого слоя многослойной почвы:

$$A(x) = \Delta T e^{-\left(\frac{x}{n \cdot l_{k(1)}} + \frac{x}{n \cdot l_{k(2)}} + \dots + \frac{x}{n \cdot l_{k(n)}}\right)} = \Delta T e^{-\sum_{y=1}^n \left(\frac{x}{n \cdot l_{k(y)}}\right)} \quad (7)$$

где  $x$  – длина от начала и до конца залегания исследуемого слоя, м;  
 $n$  – определяет количество точек аппроксимирующей функции;

$l_{k(n)}$  – коэффициент, характеризующий изменение амплитуды и сдвиг фазы температурной волны на границе слоя.

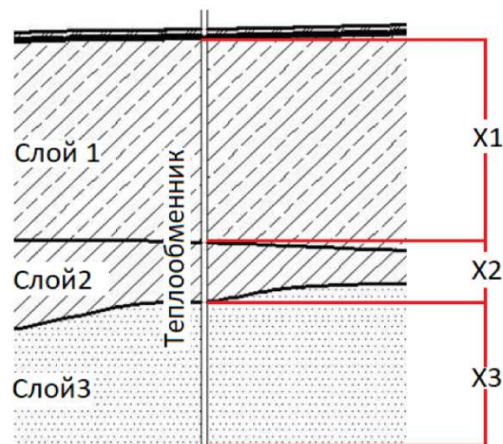


Рисунок 1 – Схема расположения теплообменника в многослойной почве

На рисунке 2 представлен график изменения коэффициента  $l_k$  для первого слоя многослойной почвы. Граница слоев расположена на глубине 1,7 метров.

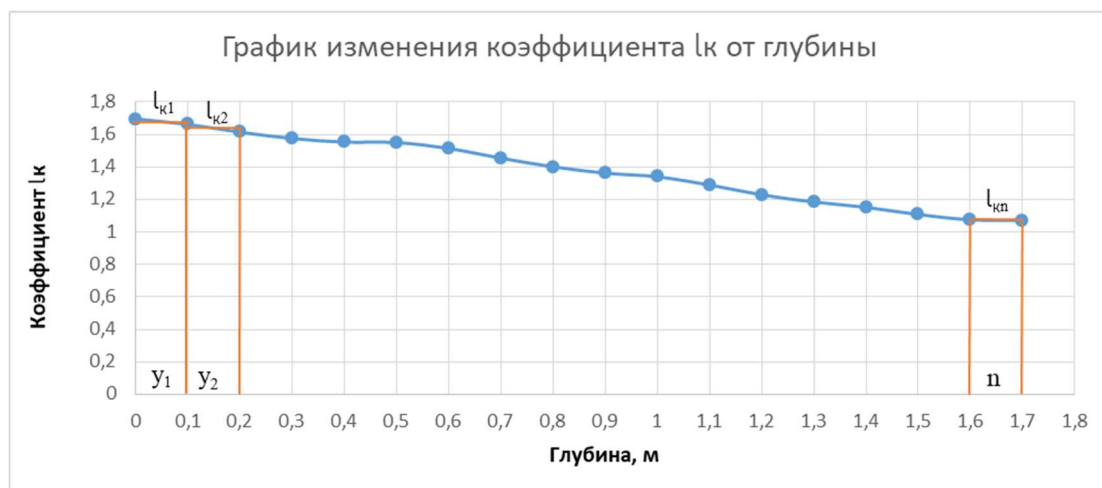


Рисунок 2 – График изменения коэффициента  $l_k$

Рассмотрим формулы для нахождения граничных значений коэффициента  $l_k$ . Верхняя граница определяется по формулам 8, 9: [3,4]

$$l_k = l_{k1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_i}{\rho_i \cdot c_i \cdot \omega_k}} \quad (8)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности почвы  $i$ -го слоя, Вт/м °С;  
 $\rho_i$  – плотность почвы  $i$ -го слоя, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_i$  – удельная теплоемкость почвы  $i$ -го слоя, Дж/(кг °С);  
 $\omega$  – круговая частота, соответствующая годовому периоду колебаний.  
 Нижняя граница слоя определяется по формуле:

$$l'_k = l_{kn} = \frac{\lambda_i \cdot l_{k(i+1)}}{\lambda_{(i+1)}} \quad (9)$$

На рисунках 3, 4 представлен график распределения температурной волны на поверхности почвы (что примерно соответствует температуре воздуха) и для двух исследуемых точек, расположенных на глубине 40 см и 320 см. Данные температуры воздуха

получены на основании материалов метеослужб [10]. Данные температуры почвы получены благодаря технологии «АИСОРИ-М» [11].



Рисунок 3 – График изменения температуры воздуха в Барнауле с 2012 года по 2022 год



Рисунок 4 – График изменения температуры почвы в Барнауле с 2012 года по 2022 год

В данном случае мы имеем 3 точки аппроксимирующей функции и можем составить по два уравнения для каждого года. Первое уравнение для точек  $[0\text{м}; 0,4\text{м}]$  находим по формуле 10.

$$l_{\text{экв}(1)} = -\frac{|x_{i+1} - x_i|}{\ln\left(\frac{\Delta T_{i+1}}{\Delta T_i}\right)} = -\frac{|0,4 - 0|}{\ln\left(\frac{\Delta T_{0,4\text{м}}}{\Delta T_{0\text{м}}}\right)} \quad (10)$$

Обрабатывая массив данных, мы получим  $n$ -е количество уравнений, равное количеству исследуемых лет. По формуле 11 мы получаем среднеарифметическое значение амплитудного коэффициента.

$$l_{\text{ср.экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n (l_{\text{экв}(i)})}{n} \quad (11)$$

Второе уравнение для точек  $[0,4\text{м}; 3,2\text{м}]$  находится аналогично формулам 10 и 11.

На основе данных прогноза температуры воздуха, используя полученные амплитудные коэффициенты, мы можем контролировать и прогнозировать изменение температуры в исследуемых точках. Использование большего количества исследуемых точек повысит точность прогноза.

### Заключение

В данной работе представлена методика расчета параметров температурной волны в многослойном грунте, предназначенная для более точного моделирования тепловых процессов в инженерных задачах. Полученная модель распределения температурной волны в многослойной почве направлена на оптимизацию процесса моделирования тепловых насосов

теплонасосных систем и решение задачи по обеспечению энергетической стабильности. Обработка массива данных позволяет построить график изменения амплитудного коэффициента и составить прогноз распределения температуры, что в свою очередь обеспечит целесообразное использование запасаемой в приповерхностных слоях Земли тепловой энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 320 с.
2. Гаранин, М. Е., Федянин В.Я. Методика расчета глубины затухания колебаний температурной волны в условиях многослойного состава почвы / М. Е. Гаранин, В. Я. Федянин // Молодежь - Барнаулу : Материалы XXV городской научно-практической конференции молодых ученых, Барнаул, 01–30 ноября 2023 года. – Барнаул: ООО "Алком", 2024. – С. 393-394.
3. Гаранин, М. Е., Федянин В.Я. Методика расчета поступления солнечной радиации на произвольно-ориентированную площадку / М. Е. Гаранин, В. Я. Федянин // Молодежь - Барнаулу : Материалы XXIII городской научно-практической конференции молодых ученых, Барнаул, 01–30 ноября 2021 года / Гл. редактор В.В.Гудков. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2022. – С. 350-352.
4. Дадацкий, А. В. Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса / А. В. Дадацкий, П. Ю. Космовский // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 23–24 мая 2019 года / Редколлегия: А.Р. Волик [и др.]. – Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. – С. 172-174.
5. Петин, Ю.М. Новое поколение тепловых насосов для целей теплоснабжения и эффективность их использования в России // Перспективы энергетики. 2004.
6. Федянин, В.Я., Неймарк, И.Б., Шарипов, Н.Б. Потенциал замещения отопительной нагрузки при использовании низкопотенциального тепла поверхности Земли // Наука и образование большого Алтая. – Барнаул, 2015. № 2. С. 90-96.
7. Шерязов, С. К. Условия определения параметров теплонасосной установки в системе солнечного теплоснабжения / С. К. Шерязов, Д. А. Поливода // Энергетика - агропромышленному комплексу России : материалы международной научно-практической конференции, Челябинск, 05–07 июня 2017 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Департамент научно-технологической политики и образования; ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный аграрный университет. – Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2017. – С. 236-241.
8. Lamarche, L., Kaji, S., Beauchamp, B. A re-view of methods to evaluate borehole thermal re-sistances in geothermal heat-pump systems. // Geothermics, 2010, Vol.39, pp.187-200.
9. Yang, H., Cui, P., Fang, Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. // Applied Energy, 2010, Vol.87, pp.16-27.
10. Средние месячные и годовые температуры воздуха в Барнауле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/29838.htm>.
11. Доступ к технологии АИСОРИ-М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru>.

### Гаранин Максим Евгеньевич

аспирант 2 курса, направления подготовки 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И.Ползунова, 656038, РФ, Барнаул, пр-т Ленина, 46, тел: +79539909189, E-mail: vsalem0@gmail.com

### Федянин Виктор Яковлевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И.Ползунова, 656038, РФ, Барнаул, пр-т Ленина, 46, E-mail: fedyanin054@mail.ru

GARANIN M.E., FEDYANIN V.YA.

## PROCESSING TEMPERATURE WAVE DATA IN THE EARTH'S SURFACE LAYERS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF HEAT PUMP SYSTEMS

**Abstract.** *The study of temperature wave propagation processes in the near-surface soil layers allows optimizing the parameters of ground heat exchangers supplying low-potential heat to the heat pump evaporator, which in turn increases the stability of the system and prevents excessive consumption of stored thermal energy in the near-surface layers of the Earth. The temperature distribution of multilayer soil is a complex problem that takes into account climatic conditions, geological properties of the soil, geometry of the multilayer soil and heat flows. Analysis of the data array of temperature waves in the soil allows analytically making a forecast depending on weather conditions and the intensity of solar radiation on the earth's surface. The article presents a technique for calculating the temperature wave distribution*

*for soil consisting of two or more layers with different thermophysical parameters. Based on meteorological service data and data from exhaust thermometers, temperature distribution graphs in the soil were constructed and a technique for determining the amplitude coefficient was given.*

**Keywords:** *renewable energy sources, temperature waves, heat pump heating systems, efficient use of low-potential heat of the Earth's surface layers.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K., Solar Energy: A Textbook for Universities / Ed. by V.I. Vissarionov. - M.: MPEI Publishing House, 2008. - 320 p.
2. Garanin, M.E., Fedyanin V.Ya. Methodology for Calculating the Attenuation Depth of Temperature Wave Oscillations in Multilayer Soils / M.E. Garanin, V.Ya. Fedyanin // Youth - to Barnaul: Proceedings of the XXV City Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Barnaul, November 1-30, 2023. - Barnaul: Alkom LLC, 2024. - P. 393-394.
3. Garanin, M. E., Fedyanin V. Ya. Methodology for calculating the influx of solar radiation onto an arbitrarily oriented site / M. E. Garanin, V. Ya. Fedyanin // Youth - Barnaul: Proceedings of the XXIII City Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Barnaul, November 1-30, 2021 / Editor-in-chief V.V. Gudkov. - Barnaul: Altai State University, 2022. - P. 350-352.
4. Dadatsky, A. V. Heat pump. Operating principle of a heat pump / A. V. Dadatsky, P. Yu. Kosmovsky // Traditions, modern problems and prospects for the development of construction: Collection of scientific articles, Grodno, May 23-24, 2019 / Editorial board: A.R. Volik [et al.]. - Grodno: Yanka Kupala State University of Grodno, 2019. - P. 172-174.
5. Petin, Yu.M. New generation of heat pumps for heat supply purposes and the efficiency of their use in Russia // Energy Prospects. 2004.
6. Fedyanin, V.Ya., Neimark, I.B., Sharipov, N.B. Potential for replacing the heating load when using low-potential heat from the Earth's surface // Science and education of the Greater Altai. - Barnaul, 2015. No. 2. P. 90-96.
7. Sheryazov, S. K. Conditions for determining the parameters of a heat pump installation in a solar heating system / S. K. Sheryazov, D. A. Polivoda // Power engineering for the agro-industrial complex of Russia: materials of the international scientific and practical conference, Chelyabinsk, June 5-7, 2017 / Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Department of Scientific and Technological Policy and Education; South Ural State Agrarian University. - Chelyabinsk: South Ural State Agrarian University, 2017. - P. 236-241.
8. Lamarche, L., Kaji, S., Beauchamp, B. A re-view of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. // Geothermics, 2010, Vol. 39, pp. 187-200.
9. Yang, H., Cui, P., Fang, Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. // Applied Energy, 2010, Vol.87, pp.16-27.
10. Average monthly and annual air temperatures in Barnaul [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/29838.htm>.
11. Access to AISORI-M technology [Electronic resource]. - Access mode: <http://aisori-m.meteo.ru>.

### **Garanin Maxim Evgenievich**

2nd year postgraduate student, training program 2.4.5 "energy systems and complexes" I.I. Polzunov AltSTU, 656038, Barnaul, 46 Lenin Ave., Russia, tel: +79539909189, E-mail: [vsalem0@gmail.com](mailto:vsalem0@gmail.com)

### **Fedyanin Viktor Yakovlevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of electricity and electrical engineering, I.I. Polzunov AltSTU, 656038, Barnaul, Lenin Ave., 46 E-mail: [fedyanin054@mail.ru](mailto:fedyanin054@mail.ru)

© Гаранин М.Е., Федянин В.Я., 2025

ТИТОВ Е.В., СОШНИКОВ А.А., КУЛИКОВА Л.В., СОЛОВСКОЙ А.С.

## ОЦЕНКА СИСТЕМ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ ОБЪЕКТАХ

**Аннотация.** *Оцениваются подходы отечественных и международных систем санитарно-гигиенического нормирования в области контроля электромагнитной обстановки на коммунально-бытовых объектах. Представлен анализ стандартов, устанавливающих предельно допустимые уровни электромагнитного поля в широком нормируемом диапазоне до оптического спектра для людей, не связанных с профессиональным обслуживанием излучающих источников. Приведены допустимые уровни составляющих электромагнитного поля в частотном спектре до 3 ТГц и сформированы диаграммы для напряженности электрического и магнитного полей в диапазоне до 300 МГц на коммунально-бытовых объектах в соответствии с отечественными санитарными правилами и нормами. Представлены в виде табличных данных и сравнительных диаграмм результаты анализа зарубежных национальных и международных нормативных документов в области контроля электромагнитного поля в частотных диапазонах до 300 ГГц для людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников. Для плотности потока энергии и напряженности высокочастотного электрического поля в России приняты одни из более строгих предельно допустимых уровней. Отечественная система санитарно-гигиенического нормирования электромагнитной обстановки на коммунально-бытовых объектах устанавливает предельно допустимые уровни для дискретных частотных диапазонов, в иностранных регламентах реализуется более глубокая проработка диапазонов. Актуальной остается проблема санитарно-гигиенической оценки электромагнитной обстановки на коммунально-бытовых объектах в условиях одновременного воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей от различных групп излучающих источников в расширенном до 3 ТГц диапазоне частот.*

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, инструментальный контроль, электромагнитная обстановка, предельно допустимый уровень, нормативно-правовое регулирование, международные рекомендации, коммунально-бытовой объект, непродовольственные условия, санитарно-гигиеническая оценка, проблематика нормирования.

### Введение

Для обеспечения электромагнитной безопасности электрооборудование должно функционировать с нормативным качеством и не оказывать неблагоприятного влияния на людей [1-3]. Принципы контроля электромагнитной обстановки не в полной мере учитывают особенности ее формирования при влиянии различных составляющих ЭМП во всем нормируемом диапазоне до оптического [2]. Национальные и международные подходы к санитарно-гигиеническому нормированию электромагнитного поля на коммунально-бытовых объектах не позволяют проводить мониторинг в условиях одновременного воздействия электрических, магнитных и электромагнитных полей от различных групп излучающих источников в расширенном до 3 ТГц диапазоне частот [3, 4]. При этом оценка состояния электромагнитной обстановки затрудняется в силу наличия противоречивых подходов национальных и международных нормативных документов [1, 5].

### Цель и задачи

Целью проводимых исследований является выявление проблематики гигиенических нормативов и требований к обеспечению безопасности неионизирующего электромагнитного поля в широком частотном диапазоне для развития принципов оценки электромагнитной обстановки на коммунально-бытовых объектах.

### Объекты и методы

Для достижения поставленной цели проведен детальный анализ российских [6-16] и иностранных [17-20] нормативно-правовых документов и научно-исследовательских статей в области контроля составляющих электромагнитного поля в частотном диапазоне до 3 ТГц для людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников. Результаты анализа отечественных нормативных документов [10-16] для оценки электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в частотном диапазоне до 300 МГц сведены в таблицы 1 и 2.

В соответствии с полученными данными (таблица 1) сформированы сравнительные диаграммы предельно допустимых уровней напряженности электрического поля в частотном диапазоне до 300 МГц от нескольких основных групп излучающих источников на коммунально-бытовых объектах, включая персональные электронно-вычислительные

машины (ПЭВМ) с другими средствами информационно-коммуникационных технологий, бытовые электроприборы и сотовые телефоны (рисунки 1-2).

Таблица 1 – Предельно допустимые уровни напряженности электрического поля в диапазоне частот до 300 МГц

Частотный диапазон	Частотные границы диапазона	ПДУ напряженности электрического поля, В/м		
		излучающие источники		
		бытовые электроприборы	ПЭВМ	сотовые телефоны
ЭСП	0-1 Гц	15000	15000	–
КНЧ	3-30 Гц	–	–	–
ПЧ	50 Гц	500	25	–
СНЧ	30-300 Гц	–	–	–
ИНЧ	0,3-3 кГц	–	–	–
ОНЧ	3-30 кГц	25	2,5	–
НЧ	30-300 кГц	25	2,5	–
СЧ	0,3-3 МГц	15	2,5	–
ВЧ	3-30 МГц	10	–	–
ОВЧ	30-300 МГц	3	–	15

Таблица 2 – Предельно допустимые уровни напряженности магнитного поля в диапазоне частот до 300 МГц

Частотный диапазон	Частотные границы диапазона	ПДУ напряженности магнитного поля, А/м		
		излучающие источники		
		бытовые электроприборы	ПЭВМ	сотовые телефоны
ПМП	0-1 Гц	–	–	–
КНЧ	3-30 Гц	–	–	–
ПЧ	50 Гц	4	3	–
СНЧ	30-300 Гц	–	–	–
ИНЧ	0,3-3 кГц	–	–	–
ОНЧ	3-30 кГц	–	1	–
НЧ	30-300 кГц	–	–	–
СЧ	0,3-3 МГц	–	–	–
ВЧ	3-30 МГц	–	–	–
ОВЧ	30-300 МГц	–	–	–

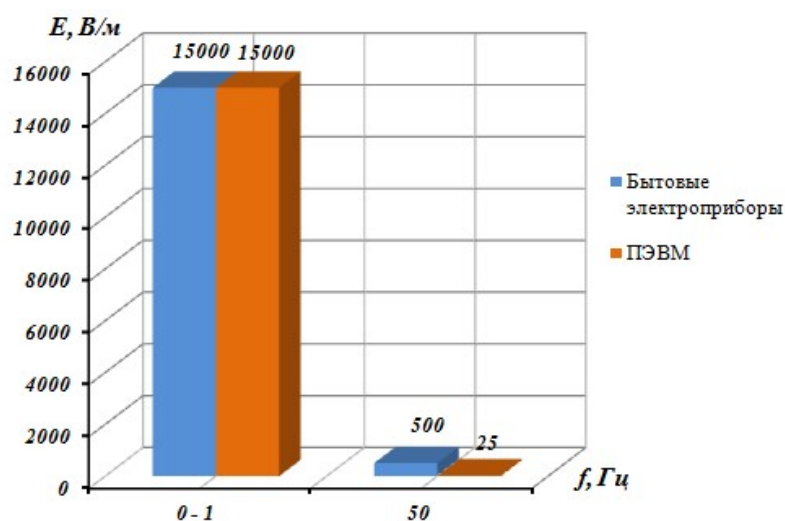


Рисунок 1 – ПДУ электрического поля в частотном диапазоне до 50 Гц от излучающих источников на коммунально-бытовых объектах

В настоящее время практически в каждом жилом доме, на большей части коммунально-бытовых объектов используются устройства, излучающие радиочастотные ЭМП выше 300 МГц. Результаты анализа отечественных нормативных документов в области мониторинга электромагнитного поля в частотном диапазоне выше 300 МГц для людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников [10-16], сведены в таблицу 3 и представлены в виде сравнительных диаграмм (рисунок 3).

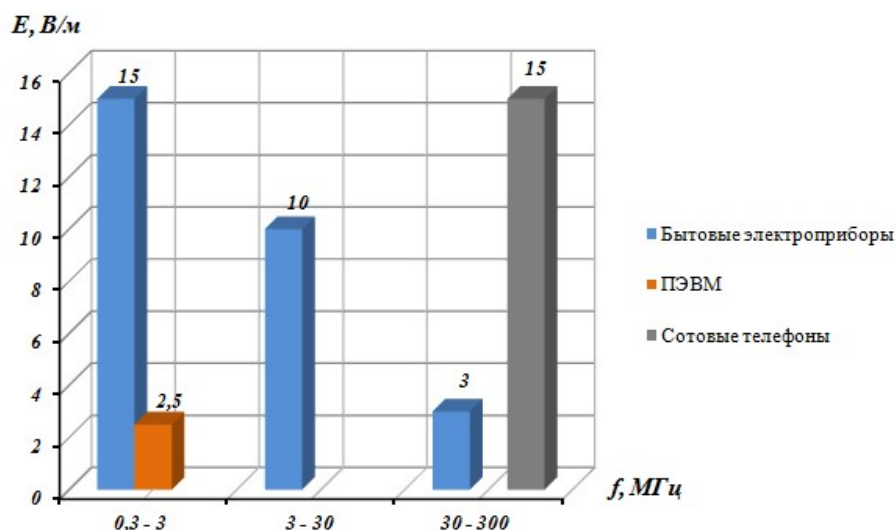


Рисунок 2 – ПДУ электрического поля в частотном диапазоне 300 кГц - 300 МГц от излучающих источников на коммунально-бытовых объектах

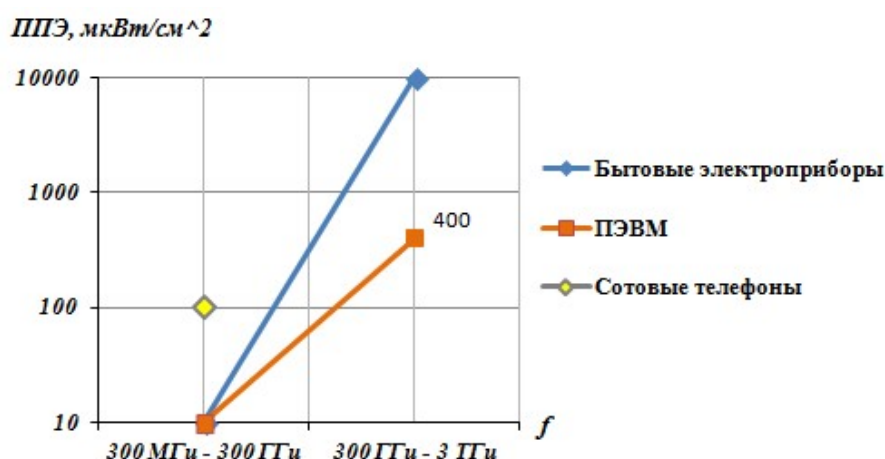


Рисунок 3 – ПДУ плотности потока энергии ЭМП в частотном диапазоне 300 МГц - 3 ТГц от излучающих источников на коммунально-бытовых объектах

Таблица 3 – Предельно допустимые уровни плотности потока энергии ЭМП в частотном диапазоне 300 МГц - 3 ТГц

Частотный диапазон	Частотные границы диапазона	ПДУ плотности потока энергии, мкВт/см <sup>2</sup>		
		излучающие источники		
		бытовые электроприборы	ПЭВМ	сотовые телефоны
УВЧ	0,3-3 ГГц	10	10	100
СВЧ	3-30 ГГц			
КВЧ	30-300 ГГц			
ГВЧ	0,3-3 ТГц	10000	400	—

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты анализа зарубежных национальных (США, Канада, Германия и Англия) и международных (международный комитет по защите от неионизирующего излучения

(ICNIRP) и европейский комитет по стандартизации в электротехнике (CENELEC)) документов, посвященным контролю электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в широком частотном диапазоне до 300 ГГц для людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников [17-20], сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Предельно допустимые уровни напряженностей электрического и магнитного полей в диапазоне частот до 300 ГГц

Страна, организация	Частотный диапазон	Предельно допустимый уровень	
		напряженности электрического поля, В/м	напряженности магнитного поля, А/м
1	2	3	4
США	3 кГц–0,1 МГц	614	163
	0,1–1,34 МГц	614	16,3/f
	1,34 –30 МГц	823,8/f	16,3/f
	30–100 МГц	27,5	158,3/f <sup>1,668</sup>
	100–300 МГц	27,5	0,0729
Канада	10 кГц–1 МГц	280	1,8
	1–10 МГц	280/f	2,1/f
	10–30 МГц	28	2,1/f
	30–300 МГц	28	0,07
Германия	10–30 кГц	1500	350
	30 кГц–2 МГц	1500	7,5/f
	2–30 МГц	3000/f	7,5/f
Англия	1–535 кГц	–	64
	535 кГц–12 МГц	–	18/f <sup>2</sup>
	12–200 МГц	50	0,13
	200–400 МГц	0,25·f	0,00066·f
	400–800 МГц	100	0,26
	800–1550 МГц	0,125·f	0,00033·f
ICNIRP	0–1 ГГц	–	3,2·10 <sup>4</sup>
	1–8 ГГц	10000	3,2·10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>
	8–25 ГГц	10000	4000/f
	0,025–0,8 кГц	250/f	4/f
	0,8–3 кГц	250/f	5
	3–150 кГц	87	5
	0,15–1 МГц	87	0,73/f
	1–10 МГц	87/f <sup>0,5</sup>	0,73/f
	10–400 МГц	58	0,073
	40–2000 МГц	1,375·f <sup>0,5</sup>	0,037·f <sup>0,5</sup>
	2–300 ГГц	61	0,16
CENELEC	30–140 кГц	300	16
	140–920 кГц	300	2,19/f
	920 кГц–19 МГц	275/f	2,19/f
	10–30 МГц	27,5	2,19/f
	30–400 МГц	27,5	0,07

Примечания:  
 1. Приведены эффективные значения для неискаженных полей.  
 2. Частота f принимает значения в рамках указанного диапазона.

В соответствии с полученными данными (таблица 4) сформированы сравнительные диаграммы предельно допустимых уровней напряженностей электрического (рисунок 4) и магнитного (рисунок 5) полей с частотой 30 МГц для людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников.

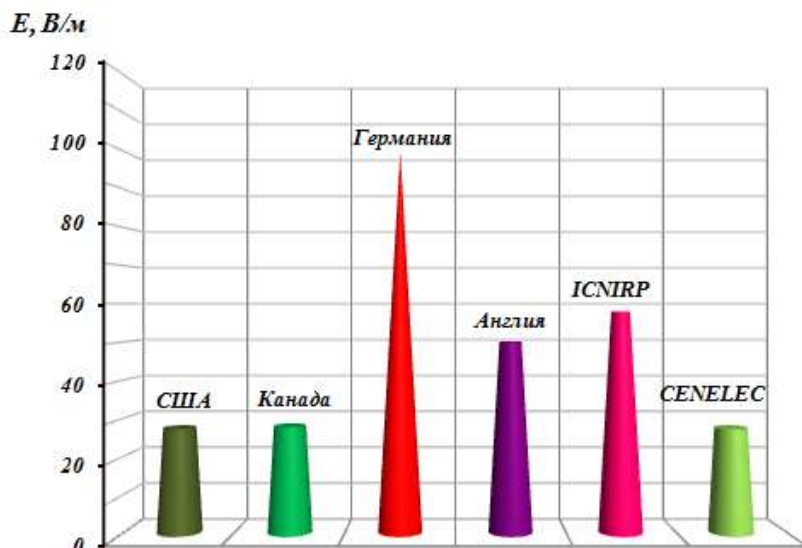


Рисунок 4 – ПДУ электрического поля с частотой 30 МГц от излучающих источников

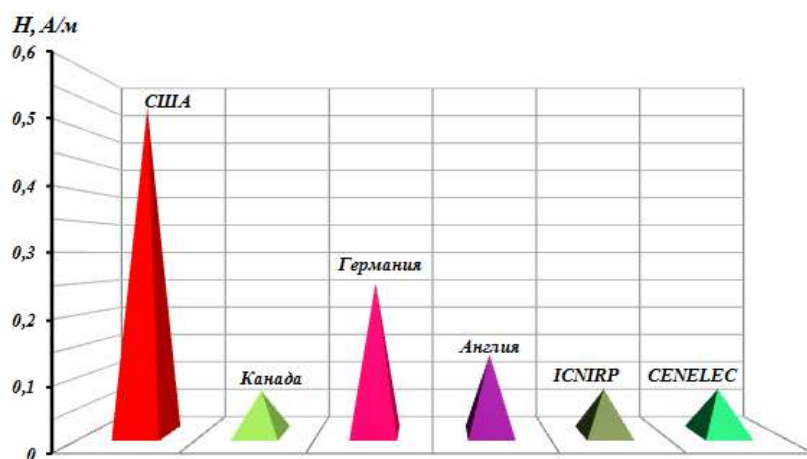


Рисунок 5 – ПДУ магнитного поля с частотой 30 МГц от излучающих источников на коммунально-бытовых объектах

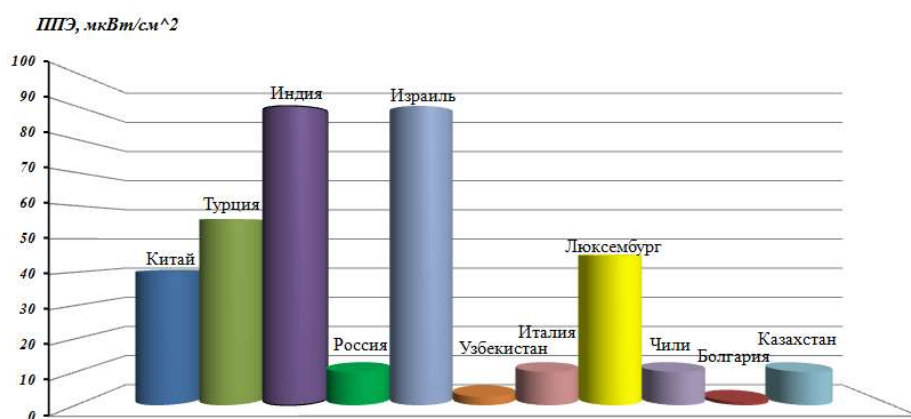


Рисунок 6 – ПДУ плотности потока энергии ЭМП с частотой 300 МГц от излучающих источников на коммунально-бытовых объектах

Результаты анализа ряда зарубежных национальных и международных стандартов в области контроля неионизирующего излучения в частотном диапазоне 300 МГц - 300 ГГц для людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников [17-20], сведены в таблицу 5 и представлены в виде сравнительных диаграмм (рисунок 6).

Анализ представленных в таблице 5 данных показывает, что для большего количества иностранных государств предельно допустимый уровень установлен в  $10 \text{ мкВт/см}^2$ , что соответствует отечественным нормам в России [16]. Однако для некоторых стран ПДУ плотности потока энергии является существенно сниженным до  $1 \text{ мкВт/см}^2$  (Болгария) и  $2,5 \text{ мкВт/см}^2$  (Узбекистан). При этом менее строгие нормы установлены в Японии, Бельгии и Испании ( $1000 \text{ мкВт/см}^2$ ).

Таблица 5 – Предельно допустимые уровни плотности потока энергии ЭМП в частотном диапазоне 300 МГц - 300 ГГц

Страна, организация	Частотный диапазон, МГц	ПДУ плотности потока, мкВт/см <sup>2</sup>
1	2	3
США	300 – 15000	$f/1500000$
	15000 – 300000	10000
Канада	300 – 1500	$f/1500000$
	1500 – 300000	1000
Германия	30 – 3000	2500
	3000 – 12000	0,8
	12000 – 300000	10000
Англия	1550 – 300000	10
Азербайджан	300 – 300000	10
Беларусь		10
Бельгия		1000
Болгария		1
Венгрия		10
Дания		1000
Израиль		90
Индия		90
Ирландия		1000
Испания		1000
Италия		10
Казахстан		10
Китай		40
Литва		10
Люксембург		45
Нидерланды		1000
Польша		10
Португалия		1000
Турция		56
Узбекистан		2,5
Украина		10
Франция		1000
Чили		10
Швейцария		10
Швеция		1000
Япония		1000
ICNIRP	10 – 400	200
	400 – 2000	$f/20000$
	2000 – 300000	1000
CELENEC	400 – 2000	$f/2000000$
	2000 – 300000	1000
Примечание:		
1. Приведены эффективные значения для неискаженных полей.		
2. Частота $f$ принимает значения в рамках указанного диапазона.		

### Заключение

Таким образом, по плотности потока энергии более строгие ПДУ установлены в ряде иностранных государств, включая Болгарию и Узбекистан, наиболее высокие предельно допустимые уровни приняты в США и Германии. Международные нормы, в частности,

установленные международным комитетом по защите от неионизирующего излучения, включают практически весь спектр частотных составляющих электромагнитного поля кроме 0 - 1 Гц (для электрического поля) и 300 ГГц - 3 ТГц, контролируемый отечественными регламентами. Кроме этого для плотности потока энергии в России учитываются нормы, в 100 раз более строгие по сравнению с максимально принятым в мире порогом, а для высокочастотных составляющих электрического поля установлены одни из более строгих предельно допустимых уровней.

Представленные табличные данные и диаграммы также показывают, что отечественная система санитарно-гигиенического нормирования электромагнитной обстановки на коммунально-бытовых объектах устанавливает ПДУ для дискретных частотных диапазонов. В иностранных же регламентах реализуется более глубокая проработка частотных диапазонов при нормировании параметров ЭМП в исследуемых условиях, что предлагается учитывать для определения допустимого времени пребывания людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием источников электромагнитного поля в расширенном до 3 ТГц диапазоне частот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Призыв учёных по защите от воздействия неионизирующего электромагнитного поля. Международное обращение к Генеральному Секретарю Организации Объединённых Наций Антониу Гутерришу, государствам - членам ООН [Электронный ресурс] – URL: <https://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal> (дата обращения: 10.10.2024). – Режим доступа: свободный.
2. Titov, E. V. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation / E. V. Titov, A. A. Soshnikov, I. E. Migalev // *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P. 34-40. – DOI 10.26866/jees.2022.1.r.58.
3. Григорьев, О. А. Управление электромагнитной обстановкой: баланс между здоровьем и технологиями / О. А. Григорьев, Ю. Б. Зубарев // *Вестник связи*. – 2020. – № 12. – С. 20-27.
4. Mazur, D. R. The Choice of Method of Computer Simulation for Formation of Pictures of Danger of Electromagnetic Environment / D. R. Mazur, Ye. V. Titov // *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. – 2024. – Vol. 17, No. 5. – P. 668-675.
5. Куликова, Л.В. Основы электромагнитной совместимости : учебник для вузов / Л.В. Куликова, О.К. Никольский, А.А. Сошников. – изд. 4-е, стер. – Москва; Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 404 с. – ISBN 978-5-4499-1175-9.
6. Титов, Е. В. Оценка подходов к санитарно-гигиеническому нормированию электромагнитного поля на производственных объектах с излучающими его источниками / Е. В. Титов, А. Е. Прасолова // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2024. – № 6(236). – С. 89-95. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-236-6-89-95.
7. Закарюкин, В. П. Электромагнитная совместимость и средства защиты : уч. пособие / В. П. Закарюкин, М. Л. Дмитриева, А. В. Крюков. – Москва-Берлин : Директ-Медиа, 2020. – 248 с. – ISBN 978-5-4499-1579-5.
8. Маслов, М. Ю. Конвергенция в нормировании и контроле электромагнитных полей современных беспроводных технологий / М. Ю. Маслов, Ю. М. Сподобаев // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2020. – Т. 60, № 9. – С. 610-613.
9. Титов, Е. В. Обоснование выбора зон контроля составляющих электромагнитного поля на поверхности излучающих источников / Е. В. Титов, А. С. Соловской, В. Ю. Васильев // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. – 2021. – № 4(60). – С. 120-124. – DOI 10.31563/1684-7628-2021-60-4-120-125.
10. ГОСТ 12.1.002–84 ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 7 с.
11. ГОСТ Р 52084–2003. Приборы электрические бытовые. Общие технические условия. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 14 с.
12. ГОСТ Р 55815–2013. Безопасность объектов и средств связи. Методы исследований и расчета уровней электромагнитных излучений при проектировании объектов связи. – Москва : Росстандарт, 2013. – 12 с.
13. МУК 4.3.1167–02. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц. – Москва : Минздрав России, 2002. – 65 с.
14. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.
15. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190–03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи. – Москва : Минздрав России, 2003. – 13 с.
16. СанПин 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – Москва : Роспотребнадзор, 2021. – 88 с.
17. Bujňáková, D. The Effect of Exposure to Non-Ionising Radiofrequency Field on *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca* and *Pseudomonas aeruginosa* biofilms / D. Bujňáková et al. // *Environmental Technology*. – 2022. – DOI 10.1080/09593330.2022.2074317.

18. Xiao, Y. Blind Source Separation and Deep Feature Learning Network-Based Identification of Multiple Electromagnetic Radiation Sources / Y. Xiao, F. Zhu, S. Zhuang and Y. Yang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – Art no. 2508813. – P. 1-13. – DOI 10.1109/TIM.2023.3259020.

19. Liang, P. SLF/ELF fields from VED solved by normalized spherical harmonic functions / P. Liang et al. // Radio Science. – 2023. – Vol. 58, No. 5. – e2022RS007651. – DOI 10.1029/2022RS007651.

20. Zhao, H.-Z. Evaluation Method of Noise Electromagnetic Radiation Interference Effect / H.-Z. Zhao, G. -H. Wei and X. -D. Pan // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, No. 1. – P. 69-78. – DOI 10.1109/TEMC.2022.3224791.

**Титов Евгений Владимирович**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»  
Доктор технических наук, доцент, ведущий научный  
сотрудник  
656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46;  
Телефон: +7(3852) 29-08-82  
E-mail: 888tev888@mail.ru

**Куликова Лидия Васильевна**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»  
Доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Электротехника и автоматизированный  
электропривод»  
656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
Телефон: +7(3852) 29-07-88  
E-mail: liliavaskul@gmail.com

**Сошников Александр Андреевич**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»  
Доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Электрификация производства и быта»  
656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
Телефон: +7(3852) 29-08-82  
E-mail: aa@soshnikov.info

**Соловской Александр Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный  
технический университет им. И.И. Ползунова»  
Старший преподаватель кафедры «Электрификация  
производства и быта»  
656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46  
Телефон: +7(3852) 29-08-82  
E-mail: epb\_401@mail.ru

TITOV E.V., SOSHNIKOV A.A., KULIKOVA L.V., SOLOVSKOY A.S.

## ASSESSMENT OF SANITARY-HYGIENIC RATIONING SYSTEMS IN THE FIELD OF ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT CONTROL AT MUNICIPAL FACILITIES

**Abstract.** *The article examines the inconsistency of approaches of domestic and international normative legal documents in the field of sanitary and hygienic assessment of the electromagnetic environment at municipal facilities. The analysis of standards that set the maximum permissible levels of the electromagnetic field in the entire normalized range up to the optical spectrum for people who are professionally unrelated to the operation and maintenance of electromagnetic field sources is shown. The permissible levels of the components of the electromagnetic field in the frequency spectrum up to 3 THz are given. Diagrams have been formed for the intensity of electric and magnetic fields in the range up to 300 MHz at municipal facilities in accordance with domestic sanitary rules and regulations. The results of the analysis of foreign national and international regulatory documents in the field of electromagnetic field control in frequency ranges up to 300 GHz for people who are not professionally connected with the operation and maintenance of radiating sources are presented in the form of tabular data and comparative diagrams. One of the stricter maximum permissible levels has been adopted in Russia for the density of the energy flow and the intensity of the high-frequency electric field. The domestic system of sanitary and hygienic regulation of the electromagnetic environment at municipal facilities sets the maximum permissible levels for discrete frequency ranges, and more in-depth study of the ranges is implemented in foreign regulations. The problem of sanitary and hygienic assessment of the electromagnetic situation at municipal facilities remains urgent in conditions of simultaneous exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields from various groups of radiating sources in the frequency range extended to 3 THz.*

**Keywords:** *electromagnetic field, instrumental control, electromagnetic environment, maximum permissible level, regulatory and legal regulation, international recommendations, communal and household facility, non-production conditions, sanitary and hygienic assessment, problems of rationing.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Prizyv uchjonyh po zashhite ot vozdejstvija neionizirujushhego jelektromagnitnogo polja. Mezhdunarodnoe obrashhenie k Generalnomu Sekretarju Organizacii Ob#edinjonnyh Nacij Antoniu Guterrishu, gosudarstvam - chlenam OON [Jelektronnyj resurs] – URL: <https://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal> (data obrashhenija: 10.10.2024). – Rezhim dostupa: svobodnyj.

2. Titov, E. V. Computer Imaging of Electromagnetic Environment in Air Space with Industrial Electromagnetic Field Sources in Conditions of Combined Influence of EM Radiation / E. V. Titov, A. A. Soshnikov, I. E. Migalev // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P. 34-40. – DOI 10.26866/jees.2022.1.r.58.

3. Grigorev, O. A. Upravlenie jelektromagnitnoj obstanovkoj: balans mezhdu zdorovem i tehnologijami / O. A. Grigorev, Ju. B. Zubarev // Vestnik svyazi. – 2020. – № 12. – S. 20-27.
4. Mazur, D. R. The Choice of Method of Computer Simulation for Formation of Pictures of Danger of Electromagnetic Environment / D. R. Mazur, Ye. V. Titov // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2024. – Vol. 17, No. 5. – P. 668-675.
5. Kulikova, L.V. Osnovy jelektromagnitnoj sovmestimosti : uchebnik dlja vuzov / L.V. Kulikova, O.K. Nikolskij, A.A. Soshnikov. – izd. 4-e, ster. – Moskva; Berlin : Direkt-Media, 2020. – 404 s. – ISBN 978-5-4499-1175-9.
6. Titov, E. V. Ocenka podhodov k sanitarno-gigienicheskomu normirovaniju jelektromagnitnogo polja na proizvodstvennyh ob#ektah s izluchajushhimi ego istochnikami / E. V. Titov, A. E. Prasolova // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – № 6(236). – S. 89-95. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-236-6-89-95.
7. Zakarjukin, V. P. Jelektromagnitnaja sovmestimost i sredstva zashhity : uch. posobie / V. P. Zakarjukin, M. L. Dmitrieva, A. V. Krjukov. – Moskva-Berlin : Direkt-Media, 2020. – 248 s. – ISBN 978-5-4499-1579-5.
8. Maslov, M. Ju. Konvergencija v normirovanii i kontrole jelektromagnitnyh polej sovremennyh besprovodnyh tehnologij / M. Ju. Maslov, Ju. M. Spodobaev // Medicina truda i promyshlennaja jekologija. – 2020. – T. 60, № 9. – S. 610-613.
9. Titov, E. V. Obosnovanie vybora zon kontrolja sostavljajushhij jelektromagnitnogo polja na poverhnosti izluchajushhij istochnikov / E. V. Titov, A. S. Solovskoj, V. Ju. Vasilev // Vestnik Bashkirskego gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – № 4(60). – S. 120-124. – DOI 10.31563/1684-7628-2021-60-4-120-125.
10. GOST 12.1.002–84 SSBT. Jelekticheskie polja promyshlennoj chasty. Dopustimye urovni naprjazhennosti i trebovanija k provedeniju kontrolja. – Moskva : Standartinform, 2009. – 7 s.
11. GOST R 52084–2003. Pribory jelekticheskie bytovyje. Obshhie tehicheskie uslovija. – Moskva : IPK Izdatelstvo standartov, 2003. – 14 s.
12. GOST R 55815–2013. Bezopasnost ob#ektov i sredstv svyazi. Metody issledovanij i rascheta urovnej jelektromagnitnyh izluchenij pri proektirovanii ob#ektov svyazi. – Moskva : Rosstandart, 2013. – 12 s.
13. MUK 4.3.1167–02. Opredelenie plotnosti potoka jenergii jelektromagnitnogo polja v mestah razmeshhenija radiosredstv, rabotajushhij v diapazone chastot 300 MGc – 300 GGc. – Moskva : Minzdrav Rossii, 2002. – 65 s.
14. SanPiN 2.1.3684-21 Sanitarno-jepidemiologicheskie trebovanija k sodержaniju territorij gorodskih i selskih poselenij, k vodnym ob#ektam, pitevoj vode i pitevomu vodosnabzheniju naselenija, atmosfernomu vozduhu, pochvam, zhilym pomeshhenijam, jekspluatcii proizvodstvennyh, obshhestvennyh pomeshhenij, organizacii i provedeniju sanitarno-protivojepidemicheskij (profilakticheskij) meroprijatij.
15. SanPiN 2.1.8/2.2.4.1190–03. Gigienicheskie trebovanija k razmeshheniju i jekspluatcii sredstv suhoputnoj podvizhnoj radiosvyazi. – Moskva : Minzdrav Rossii, 2003. – 13 s.
16. SanPin 1.2.3685–21. Gigienicheskie normativy i trebovanija k obespecheniju bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlja cheloveka faktorov sredy obitaniya». – Moskva : Rospotrebnadzor, 2021. – 88 s.
17. Bujňáková, D. The Effect of Exposure to Non-Ionising Radiofrequency Field on Escherichia coli, Klebsiella oxytoca and Pseudomonas aeruginosa biofilms / D. Bujňáková et al. // Environmental Technology. – 2022. – DOI 10.1080/09593330.2022.2074317.
18. Xiao, Y. Blind Source Separation and Deep Feature Learning Network-Based Identification of Multiple Electromagnetic Radiation Sources / Y. Xiao, F. Zhu, S. Zhuang and Y. Yang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – Art no. 2508813. – P. 1-13. – DOI 10.1109/TIM.2023.3259020.
19. Liang, P. SLF/ELF fields from VED solved by normalized spherical harmonic functions / P. Liang et al. // Radio Science. – 2023. – Vol. 58, No. 5. – e2022RS007651. – DOI 10.1029/2022RS007651.
20. Zhao, H.-Z. Evaluation Method of Noise Electromagnetic Radiation Interference Effect / H.-Z. Zhao, G. -H. Wei and X. -D. Pan // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2023. – Vol. 65, No. 1. – P. 69-78. – DOI 10.1109/TEM.2022.3224791.

**Titov Evgeny Vladimirovich**

Polzunov Altai State Technical University  
 Doctor of Technical Sciences, associate professor, leading researcher  
 656038, Altai Krai, Barnaul, Lenin Ave. 46  
 Phone: +7(3852) 29-08-82  
 E-mail: 888tev888@mail.ru

**Soshnikov Alexander Andreevich**

Polzunov Altai State Technical University  
 Doctor of Technical Sciences, professor, professor in the Department of Electrification of Production and Life  
 656038, Altai Krai, Barnaul, Lenin Ave. 46  
 Phone: +7(3852) 29-08-82  
 E-mail: aa@soshnikov.info

**Kulikova Lidiya Vasilyevna**

Polzunov Altai State Technical University  
 Doctor of Technical Sciences, professor, professor in the Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drive  
 656038, Altai Krai, Barnaul, Lenin Ave. 46  
 Phone: +7(3852) 29-07-88  
 E-mail: liliavaskul@gmail.com

**Solovskoy Alexander Sergeevich**

Polzunov Altai State Technical University  
 Senior Lecturer in the Department of Electrification of Production and Life  
 656038, Altai Krai, Barnaul, Lenin Ave. 46  
 Phone: +7(3852) 29-08-82  
 E-mail: epb\_401@mail.ru

НИКОЛЬСКИЙ О.К., КУЛИКОВА Л.В., СУРИНСКИЙ Д.О., БАСУМАТОРОВА Е.А.

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ АПК ОТ ВРЕДИТЕЛЕЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ

**Аннотация.** При проектировании технологического процесса производства сельскохозяйственной продукции важное значение имеет уровень планируемой урожайности. Именно она определяет будущий уровень энергетических затрат. Выбор низкого уровня урожайности приводит к недобору продукции, при этом не будут реализованы потенциальные возможности сортов и природных факторов. В этом случае при возможно низких общих энергетических затратах энергоёмкость продукции может оказаться высокой. Получение чрезмерно высокой урожайности потребует больших дополнительных энергетических затрат, что приведёт к удорожанию технологического процесса производства продукции, но, возможно, с низкой энергоёмкостью. В статье исследуется универсальная система защиты объектов АПК от вредителей как инструмент определения относительной энергоёмкости продукции, авторы статьи утверждают, что универсальная система защиты, помимо прямого предназначения, позволяет измерять и записывать показания изменяющихся физических величин и необходимые расчеты по определению относительной энергоёмкости, т.е. может быть использована для автоматического контроля и управления эффективностью энергопотребления на предприятиях агропромышленного комплекса.

**Ключевые слова:** универсальная система, защита, энергетика, энергоёмкость, продукция, вредители, инструмент, процесс.

### Введение

Энергоёмкость продукции растениеводства зависит как от совершенства самих энергетических операций, так и от получаемого при этом урожая. Увеличение последнего при прочих равных энергетических затратах приводит к снижению энергоёмкости. Поэтому первоочередная задача при энергетическом анализе производства продукции растениеводства – всесторонний анализ технологического процесса. Причём не только на предмет энергоэффективности используемых оборудования и машин, но и на предмет эффективности использования почвы, удобрений, средств защиты растений, производимых видов продуктов, их сортов, а также множества других факторов, в той или иной степени влияющих на конечный урожай [1].

Уровень урожайности определяет будущий уровень энергетических затрат. Выбор низкого уровня урожайности приводит к недобору продукции, при этом не будут реализованы потенциальные возможности сортов и природных факторов. В этом случае при возможно низких общих энергетических затратах энергоёмкость продукции может оказаться высокой. Высокая урожайность требует больших дополнительных энергетических затрат, результатом станет удорожание технологического процесса в производстве продукции, хотя энергоёмкость может быть низкой [2]. Комплекс технологических операций по уходу за растениями разрабатывается с учётом способов подготовки почвы и посева, сроков прохождения основных фаз развития, погодных и почвенных условий, степени засорённости сорными растениями, прогноза развития основных болезней и распространения насекомых-вредителей. Дается биологическое обоснование каждому мероприятию (пахота, прикатывание, до- и послеуборочное боронование, междурядные обработки, подкормки, применение химикатов против сорняков, болезней и вредителей и др.). Тем самым обосновывается выбор химикатов с указанием норм расхода, сроков, способов и кратности их применения и с учётом экологических требований [3, 4].

Для сферы энергетики главное содержание производственно-технологического вида деятельности в современном представлении заключается в надежном энергообеспечении всех энерготехнологических процессов (ЭТП), необходимых для производства продукции [5]. Цель достигается выбором энергетического оборудования по максимальной нагрузке. Однако переход производства в рыночные условия вывел энергоёмкость продукции в число определяющих конкурентоспособность, таким образом определяет цель минимизации расхода энергии в процессе производства продукции сельского хозяйства.

### Материалы и методы

В данном исследовании описана методика определения энергоемкости энергетических процессов в любом элементе [7].

В системе борьбы с вредителями (насекомые, грызуны, птицы), технической основой такой возможности является универсальная система защиты (УСЗ) предприятий АПК, во многом подобная известным коммерческим АСКУЭ, но отличающаяся принципиально кратковременностью использования и мотивацией. Основные требования к УСЗ заключаются в одновременной регистрации вредителей совместно со значениями энергетических параметров на элементах и специальном программном обеспечении [8].

Система защиты агропромышленного комплекса, разработанная в университетах ГАУ Северного Зауралья и Алтайского ГТУ, позволяет управлять защитными мероприятиями от вредителей, проводить измерения, регистрацию, индикации переменных физических величин и необходимые вычисления по определению относительной энергоемкости ЭТП, а также может быть использована для автоматического контроля и управления эффективностью энергопотребления предприятия агропромышленного комплекса, где необходимо многоканальное измерение, регистрация, контроль и управления [9]. Для создания структурной схемы универсальной системы защиты от вредителей, необходимо учитывать следующие основные компоненты:

1. Датчики:
  - Датчики движения;
  - Датчики температуры;
  - Датчики влажности;
  - Датчики уровня газа.
2. Контроллеры:
  - Микроконтроллеры;
  - Контроллеры доступа;
  - Контроллеры питания.
3. Исполнительные устройства:
  - Сигнальные устройства;
  - Блокировочные устройства;
  - Оповещающие устройства.
4. Центральный процессор:
  - Обработка и анализ данных;
  - Принятие решений;
  - Управление всей системой.
5. Интерфейс:
  - Локальный интерфейс для управления системой;
  - Удаленный интерфейс для мониторинга и настройки.
6. Питание:
  - Источники питания;
  - Резервное питание.
7. Система связи:
  - Проводные и беспроводные средства связи;
  - Система мониторинга и управления.

Проведенные исследования были проведены при помощи УСЗ на предприятии Тюменской области ООО «ЗапСибХлеб-Исеть» в 2024 году, где показали высокую степень ее эффективности и надежности.

### Результаты исследования

Важным результатом исследования данной работы стало формирование теоретических предпосылок построения защиты сельхозкультур в агропромышленном комплексе и на энергетических предприятиях.

В рамках исследования необходимо изучить процессы производства и передачи энергии, оценить эффективность использования энергии в различных отраслях

промышленности и сферах жизнедеятельности. Также важно изучить возможности применения новых технологий и инноваций для повышения энергоэффективности и снижения потребления энергии. Это позволит оптимизировать процессы производства, сократить расходы на энергию и снизить воздействие на окружающую среду.

Дополнительно следует провести анализ энергопотребления и разработать рекомендации по снижению потребления энергии на предприятии или в организации. Также важно оценить эффективность использования оборудования и инфраструктуры для энергетических процессов и предложить меры по их улучшению.

Данное исследование ЭТП будет одним из ключевых моментов для увеличения энергоэффективности и позволяет выявить слабые места и также увидеть моменты для дальнейшего качественного использования энергии и ресурсов [10]. А также вспомогательные ЭТП, обеспечивающих условия жизнедеятельности, по оборудованию которых на службу возложена только эксплуатационная ответственность. Основной производственный ЭТП также может находиться на ограниченной ответственности службы, обусловленной только надежностью энергообеспечения [11]. Технический энергетический аудит дает различные значения энергоемкости продукции не только от производительности технологии или режимов загрузки оборудования, но и от сезонности и времени года, а также суточного времени. Таким образом получение эффективного научно-обоснованного результата по энергетическому сбережению важно, чтобы предшествовало исследование систем энергообеспечения [12].

Снижение энергоемкости в производстве может оказать положительное влияние на экономические показатели предприятия. Вот несколько примеров:

1. Снижение затрат на энергию. Уменьшение энергопотребления позволит снизить затраты на энергию, что приведет к уменьшению общих производственных издержек.
2. Увеличение конкурентоспособности. Благодаря снижению стоимости производства продукция предприятия станет более конкурентоспособной на рынке, что позволит увеличить объемы продаж и получить дополнительные доходы.
3. Сокращение вредного воздействия на окружающую среду. Уменьшение потребления энергии также снизит выбросы вредных веществ в окружающую среду, что может помочь предотвратить экологические проблемы и снизить риски штрафов за нарушение экологических стандартов.
4. Привлечение инвестиций. Современные инвесторы все чаще обращают внимание на экологическую ответственность предприятий. Улучшение энергоэффективности может привлечь внимание инвесторов и увеличить вероятность получения инвестиций.

Таким образом, снижение энергоемкости может принести предприятию целый ряд экономических выгод и улучшить его финансовое положение в целом. В настоящее время связь между всеми этими элементами находятся в трудах авторов Карпова В.Н. и Суринского Д.О., где приведены к определению энергии, возрастающей при энергосбережении [13].

### **Заключение**

Предполагается, что из всех факторов, создающих полную себестоимость продукции, только энергия обладает свойством увеличивать свою доходность за счет внутрипроизводственных мер по энергосбережению, и обеспечивать увеличение общей доходности. При этом, как уже указывалось, энергетическому совершенствованию должны подвергаться все процессы, связанные с потребленной энергией, и само энергосбережение должно рассматриваться как профессионально разработанный разносторонний проект с оценкой эффективности инвестиций.

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод, что:

1. Проведено экспериментальное исследование светоловушки для насекомых. Подтверждены прогнозируемые технико-экономические показатели по снижению экономического ущерба на 40 %.
2. Проведены исследования работы электродератизатора. Подтверждены прогнозируемые технико-экономические показатели по снижению экономического ущерба на 70 %.
3. Проведены исследования работы электроотпугивателя птиц. Подтверждены прогнозируемые технико-экономические показатели по снижению количества особей на 75%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов В.Н. Энергосбережение. Метод конечных отношений / В.Н. Карпов - СПбГАУ, 2009. - 137с.
2. Карпов В.Н. Введение в энергосбережение на предприятиях АПК / В.Н. Карпов - СПб, СПбГАУ, 1999. - 72 с.
3. Savchuk I., Marandin A., Surinskiy D. Calculation of crop production using integrated plant protection against pests / I Savchuk., A Marandin., D. Surinskiy // Web of Conferences Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. 2020. - С. 06008
4. Pv-based energy-saving electro-optical converter development / D.O. Surinskiy, I.V. Savchuk, E.V. Solomin et al. // 19th International Scientific Geoconference SGEM2019. Conference proceedings. 2019. - Р. 427–434.
5. Савчук И.В., Суринский Д.О., Чурсин О.В. Результаты экспериментальных исследований отпугивания синантропных птиц на объектах АПК / И.В. Савчук, Д.О.Суринский, О.В. Чурсин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2021. - № 1 (87). - С. 181–184.
6. Егоров С.В., Савчук И.В., Суринский Д.О. Ультразвуковое устройство для отпугивания грызунов / С.В. Егоров, И.В. Савчук, Д.О. Суринский // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2021. - № 5 (91). - С. 117–121
7. Суринский Д.О., Савчук И.В., Чурсин О.В. Теоретические аспекты расчёта основных конструктивных параметров электроотпугивателя птиц / Д.О. Суринский, И.В. Савчук, О.В. Чурсин // АгроЭкоИнфо. - 2021. - № 5 (47).
8. Суринский Д.О., Марандин А.И. Техноэкономическая эффективность использования энергосберегающего светодиодного электрооптического преобразователя ЭСЭП для мониторинга насекомых-вредителей / Д.О. Суринский, А.И. Марандин // АгроЭкоИнфо. - 2021. - № 5 (47).
9. Суринский Д.О., Егоров С.В., Щинников И.А. Исследование способов борьбы с грызунами и анализ существующих устройств, сконструированных на основе электрофизического метода борьбы / Д.О. Суринский, С.В. Егоров, И.А. Щинников // АгроЭкоИнфо. - 2021. - № 6 (48)
10. Суринский Д.О., Щинников И.А. Тенденции развития направления электродератизации / Д.О. Суринский, И.А. Щинников // АгроЭкоИнфо. - 2021. - № S7.
11. Савчук И.В., Басуматорова Е.А., Суринский Д.О.. Использование электрооптических устройств для защиты сельскохозяйственных культур / И.В. Савчук, Е.А. Басуматорова, Д.О. Суринский и др. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2020. - № 6 (86). - С. 149 – 152.
12. Суринский Д.О. Параметры и режимы энергосберегающего электрооптического преобразователя для мониторинга насекомых-вредителей: дис. ... канд. техн. наук. / Д.О. Суринский - Тюмень, 2013.
13. Елизаров В.В., Суринский Д.О. Методика применения напряжения высокой частоты в высоковольтных устройствах для отпугивания синантропных птиц / В.В. Елизаров, Д.О. Суринский // Вестник КрасГАУ. - 2017. - № 12 (135). - С 96-100.

### Никольский Олег Константинович

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул  
Доктор технических наук, главный научный сотрудник,  
профессор кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод»  
656038, г. Барнаул, проспект Ленина, д. 46  
Тел. 8 (3852) 36-71-29  
E-mail: epb\_401@mail.ru

### Куликова Лидия Васильевна

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул  
Доктор технических наук, профессор кафедры  
«Электротехника и автоматизированный электропривод»  
656038, г. Барнаул, проспект Ленина, д. 46  
Тел. 8-903-948-6791  
E-mail: liliavaskul@gmail.com

### Суринский Дмитрий Олегович

ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Электротехника и автоматизированный электропривод»  
625004, г. Тюмень, улица Республика д. 7  
Тел. 8 922 0719444  
E-mail: surinskiy.do@gausz.ru

### Басуматорова Екатерина Анатольевна

ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»  
Преподаватель кафедры «Электротехника и автоматизированный электропривод»  
625004, г. Тюмень, улица Республика д. 7  
Тел. 8 922 2967861  
E-mail: basumatorovaea.21@mti.gausz.ru

NIKOLSKY O.K., KULIKOVA L.V., SURINSKY D.O., BASUMATOROVA E.A.

## THE UNIVERSAL SYSTEM OF PROTECTION OF AGRICULTURAL FACILITIES FROM PESTS AS A TOOL FOR DETERMINING THE RELATIVE ENERGY INTENSITY OF PRODUCTS

**Abstract.** When designing the technological process of agricultural production, the level of planned yield is important. It determines the future level of energy costs. Choosing a low yield level leads to a shortage of products, while the potential of varieties and natural factors will not be realized. In this case, with the lowest possible total energy costs,

*the energy intensity of the products may be high. Obtaining excessively high yields will require large additional energy costs, which will lead to an increase in the cost of the technological process of production, but possibly with low energy intensity. The article examines the universal system of protection of agricultural facilities from pests as a tool for determining the relative energy intensity of products, the authors of the article argue that the universal protection system, in addition to its direct purpose, allows you to measure and record readings of changing physical quantities and the necessary calculations to determine the relative energy intensity, i.e. It can be used for automatic control and management of energy consumption efficiency at enterprises of the agro-industrial complex.*

**Keywords:** universal system, protection, energy, energy intensity, products, pests, tools, process.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Karpov B.H. Energy saving. The method of finite relations / V.N. Karpov - SP6GAU, 2009. - 137c.
2. Karpov B.H. Introduction to energy saving at agricultural enterprises / V.N. Karpov - SP6, SP6GAU, 1999. - 72 p.
3. Savchuk I., Marandin A., Surinskij D. Calculation of crop production using integrated plant protection against pests / I Savchuk., A Marandin., D. Surinskij // Web of Conferences Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. 2020. - p. 06008
4. Pv-based energy-saving electro-optical converter development / D.O. Surinskiy, I.V. Savchuk, E.V. Solomin et al. // 19th International Scientific Geoconference SGEM2019. Conference proceedings. 2019. - P. 427-434.
5. Savchuk I.V., Surinsky D.O., Chursin O.V. Results of experimental studies of scaring synanthropic birds at agricultural facilities / I.V. Savchuk, D.O. Surinsky, O.V. Chursin // Izvestiya Orenburg State Agrarian University. - 2021. - No. 1 (87). - pp. 181-184.
6. Egorov S.V., Savchuk I.V., Surinsky D.O. Ultrasonic device for repelling rodents / S.V. Egorov, I.V. Savchuk, D.O. Surinsky // Izvestiya Orenburg State Agrarian University. - 2021. - No. 5 (91). - pp. 117–121
7. Surinsky D.O., Savchuk I.V., Chursin O.V. Theoretical aspects of calculating the main design parameters of an electric bird repeller / D.O. Surinsky, I.V. Savchuk, O.V. Chursin // AgroEcoInfo. - 2021. - № 5 (47).
8. Surinsky D.O., Marandin A.I. Technical and economic efficiency of using an energy-saving LED electro-optical converter ESEP for monitoring insect pests / D.O. Surinsky, A.I. Marandin // AgroEcoInfo. - 2021. - No. 5 (47).
9. Surinsky D.O., Egorov S.V., Shchinnikov I.A. Investigation of methods of rodent control and analysis of existing devices designed on the basis of the electrophysical method of control / D.O. Surinsky, S.V. Egorov, I.A. Shchinnikov // AgroEcoInfo. - 2021. - № 6 (48)
10. Surinsky D.O., Shchinnikov I.A. Trends in the development of the direction of electroderatization / D.O. Surinsky, I.A. Shchinnikov // AgroEcoInfo. - 2021. - № 5 (47).
11. Savchuk I.V., Basumatorova E.A., Surinsky D.O.. The use of electro-optical devices for the protection of agricultural crops / I.V. Savchuk, E.A. Basumatorova, D.O. Surinsky, etc. // Izvestiya Orenburg State Agrarian University. - 2020. - № 6 (86). - Pp. 149-152.
12. Surinsky D.O. Parameters and modes of an energy-saving electro-optical converter for insect pest monitoring: dis.... Candidate of Technical Sciences / D.O. Surinsky - Tyumen, 2013.
13. Elizarov V.V., Surinsky D.O. Method of applying high-frequency voltage in high-voltage devices for scaring off synanthropic birds / V.V. Elizarov, D.O. Surinsky // Bulletin of KrasGAU. - 2017. - № 12 (135). - From 96-100.

### **Nikolsky Oleg Konstantinovich**

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul  
Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher,  
Professor of the Department of Electrical Engineering and Automated Electric Drives  
656038, Barnaul, Lenin Avenue, 46  
Tel. 8 (3852) 36-71-29  
E-mail: epb\_401@mail.ru

### **Surinsky Dmitry Olegovich**

State Agrarian University of the Northern Urals,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of  
the Department of Electrical Engineering and Automated  
Electric  
Drive, 7 Respublika Street, Tyumen,  
625004 Tel. 8 922 0719444  
E-mail: surinskiy.do@gauszu.ru

### **Kulikova Lidiya Vasilyevna**

Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the  
Department of Electrical Engineering and Automated  
Electric Drives  
656038, Barnaul, Lenin Avenue, 46  
Tel. 8-903-948-6791  
E-mail: liliavaskul@gmail.com

### **Basumatorova Ekaterina Anatolyevna**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher  
Education "State Agrarian University of the Northern  
Urals"  
Lecturer of the Department "Electrical Engineering and  
Automated Electric Drive"  
625004, Tyumen, Republic Street, 7  
Tel. 8 922 2967861  
E-mail: basumatorovaea.21@mti.gauszu.ru

КАЗАКОВ Ю.Н.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ

**Аннотация.** Работа рассматривает вопросы расчета энергетических характеристик конических гидродинамических подшипников жидкостного трения. Представлена математическая модель опоры на базе уравнения Рейнольдса в цилиндрических координатах. Результаты моделирования показывают, что значение момента трения зависит только от эксцентриситета ротора, а эта зависимость сильно не линейна на больших эксцентриситетах. Точность расчета также сильно зависит от положения ротора, однако ее можно улучшить за счет увеличения размера конечно-разностной сетки. Увеличение значений зазора и температуры смазочной жидкости уменьшают значение момента трения, причем они имеют нелинейный характер изменений. Скорость вращения ротора является одним из ключевых кинематических параметров роторной системы. Из данных представленных в работе видно, что с увеличением скорости вращения степень всплытия ротора значительно возрастает, причем данная зависимость не линейна и хорошо прослеживается на низких скоростях вращения. Значения момента трения и потерь мощности в точках равновесия значительно возрастают с ростом скорости.

**Ключевые слова:** конические подшипники жидкостного трения, энергетические характеристики, момент трения, моделирование.

### Введение

Подшипниковые узлы являются одним из самых нагруженных элементов роторных машин. В результате чего, вызывают большой интерес среди исследователей. Радиальные и упорные подшипники на сегодня являются наиболее изученными, в то время как конические опоры жидкостного трения не получили большого развития из-за сложностей их применения. В современных условиях развития науки и техники все большую популярность набирают активные опоры жидкостного трения. Исследования показывают, что внедрение активного управления в известные виды опор жидкостного трения позволяет значительно повысить их эффективность. В результате, появляется возможность увеличения сферы применения конических опор жидкостного трения, за счет использования активного управления. Однако, это требует детального изучения таких опор: их характеристик и зависимостей от параметров самой системы и внешних воздействий.

Сегодня в области конических опор жидкостного трения большое внимание отводится исследованию вопросам несущей способности и устойчивости [1–3]. В тоже время, когда речь заходит о паре трения (вал-подшипник) важной характеристикой является момент трения, который характеризует энергетические потери и эффективность работы машины. Момент трения может зависеть от многих факторов: вида трения, способа создания несущей способности (гидродинамический [4,5] и гидростатический подшипники жидкостного трения [6,7]), реологических и теплофизических свойств [8], кинематических и силовых факторов [4], а также от геометрических параметров самой опоры [9,10].

Проведенные экспериментальные исследования в работе [8] показывают зависимость момента трения от температуры смазочного вещества, а также от положения ротора в подшипнике. Исследования проводились для цилиндрического гидродинамического подшипника жидкостного трения. Также в работе [4] авторы показали результаты экспериментальных исследований по определению момента трения в зависимости от скорости вращения ротора. В работе [7] авторы исследовали цилиндрический гидростатический подшипник жидкостного трения. Исследователи экспериментально установили значения момента трения в зависимости от давления подачи смазочного вещества и внешней нагрузки. Также в [11] экспериментально исследовалось влияние внешней нагрузки на значение момента трения при разных скоростях вращения ротора.

Также большое внимание исследователей уделяется влиянию конструктивных параметров на энергоэффективность опор жидкостного трения [12]. Так в работе [13] авторы рассматривали применение генетических алгоритмов оптимизации для поиска наилучших геометрических параметров опоры. В свою очередь в [14] исследователи добились снижения потерь на вязкое трение за счет регулирования формы поверхности подшипника. Влияние

реологических свойств смазочной жидкости на трение в опоре также является одним из актуальных направлений исследований [15,16].

Что касательно конических подшипников жидкостного трения, то исследований в области трения очень мало. В работе [17] представлены расчеты оптимальных размеров гидростатического конического подшипника жидкостного трения для получения минимального момента трения. Результаты показаны как для ламинарного, так и для турбулентного условий течения. Также в работе [18] был рассмотрен активный конический подшипник жидкостного трения и вопросы минимизации момента трения.

В данной работе проводится детальное исследование зависимостей момента трения от основных геометрических, реологических и кинематических параметров. А также затрагиваются вопросы поиска оптимальных положений ротора.

### Математическая модель конического подшипника жидкостного трения

В работе рассматривается математическая модель конического подшипника жидкостного трения конечной длины. Схема данной опоры представлена на рисунке 1. Вязкая, несжимаемая жидкость движется в канале между валом и втулкой. Жидкость характеризуется следующими параметрами: вязкость –  $\mu$  и плотность –  $\rho$ , подается с торца с постоянным давлением  $p_0$ . Внешний конус (втулка) является неподвижным, а его радиус равен  $R(z) = r(z) + h_0$ , где  $r(z)$  радиус внутреннего подвижного конуса (вала), который вращается с частотой  $n$ , а  $h_0$  – средний зазор.

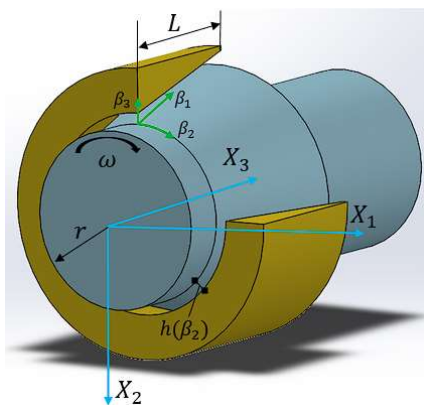


Рисунок 1 – Схема конического подшипника жидкостного трения

Математическая модель конического подшипника базируется на совместном решении уравнения движения жидкости (1) и неразрывности среды (2). Также, основные уравнения удобнее представить в цилиндрических координатах  $\beta_i$ , где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  соответственно радиальная, угловая и осевая координаты. Цилиндрические координаты характеризуются коэффициентами Ламе  $H_1 = H_3 = 1, H_2 = \beta_1$ .

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \nabla \cdot T_\sigma + \rho \vec{f}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (2)$$

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет получить модифицированное уравнение Рейнольдса в цилиндрических координатах с возможностью применения для конических подшипников жидкостного трения [18,19]:

$$h^3 \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left( \beta_1 \frac{\partial p}{\partial \beta_1} \right) + \frac{1}{\beta_1} \frac{\partial}{\partial \beta_2} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \right) = \mu u_1 6h + \mu u_2 6 \frac{\partial h}{\partial \beta_2} - \mu 12 u_3 \beta_1 \quad (3)$$

где  $h$  - значение зазора смазочного слоя,  $p$  - давление жидкости в опоре,  $u_i$  – компоненты скорости движения жидкости с учетом разложения на оси. Функции скоростей движения жидкости и зазора в цилиндрических координатах определяются геометрически [18,19].

Зная касательное напряжение  $s_{12}$  на поверхности внутреннего конуса с учетом интегрирования поля давлений полученного на основе решения уравнения Рейнольдса (3) можно найти результирующий момент силы трения:

$$T_{fr} = -r \int_{\beta_2^-}^{\beta_2^+} \int_{\beta_1^-}^{\beta_1^+} \left( \frac{\partial p}{\partial \beta_2} \frac{h}{2\beta_1} + \frac{u_2 \mu}{h} \right) \beta_1 d\beta_1 H_2 d\beta_2. \quad (4)$$

В результате уравнения расчета потерь мощности на трение в опоре примет вид:

$$N_{fr} = M\omega.$$

Динамическая модель роторной системы была разработана как одностепенная модель, где ротор движется в подшипнике под действием внешних сил и реакций смазочного слоя:

$$m \begin{bmatrix} dV_1/dt \\ dV_2/dt \\ dV_3/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^b \\ F_2^b \\ F_3^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_3^C \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

где  $\vec{V} = [V_1 \ V_2 \ V_3]$  компоненты вектора скорости движения центра ротора,  $g$  – ускорение свободного падения,  $m$  – масса ротора,  $F_i^b$  – сила реакции смазочного слоя в проекциях на оси, которая равна интегралу полученного поля давлений,  $F_3^C$  – сила реакции муфты.

Представленные в данном разделе уравнения решались в программном комплексе MATLAB. Для решения уравнения Рейнольдса (3) использовался численный метод решения дифференциальных уравнений – метод конечных разностей. Используемая модель ранее была верифицирована в работе [18]. Исследовалась коническая опора жидкостного трения со следующими параметрами: малый диаметр  $d=40$  мм, длина  $L=64$  мм, угол полу конусности  $\alpha=10^\circ$ , зазор  $h_0=100$  мкм, в качестве смазочной жидкости использовалась вода при температуре  $20^\circ\text{C}$  с вязкостью  $\mu = 1,13 \cdot 10^{-3}$  Па·с, давление подачи жидкости – атмосферное, частота вращения ротора  $n=3000$  об/мин, масса ротора 6 кг.

### Результаты

Как показывают многие работы, зависимость момента трения от положения ротора является одной из основных для исследования. В результате, описанная выше модель при заданных параметрах первоначально была использована для анализа данной зависимости применимо к коническому подшипнику жидкостного трения. Расчеты проводились для положений ротора в диапазоне эксцентриситетов от 0,01 до 0,9 и окружной координате с шагом  $10^\circ$ . В результате было получено поле значений момента трения для разных положений ротора в подшипнике (рисунок 2).

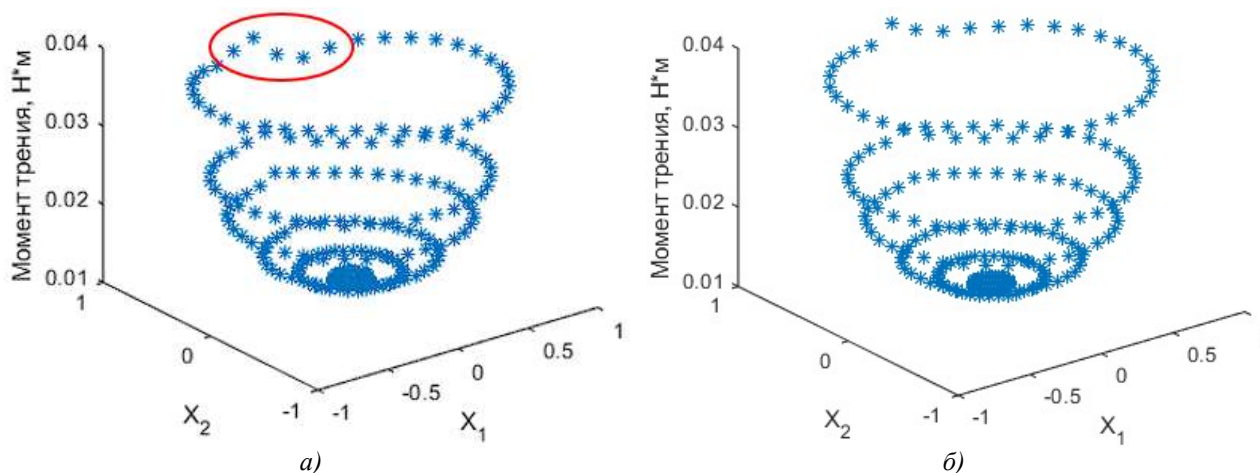
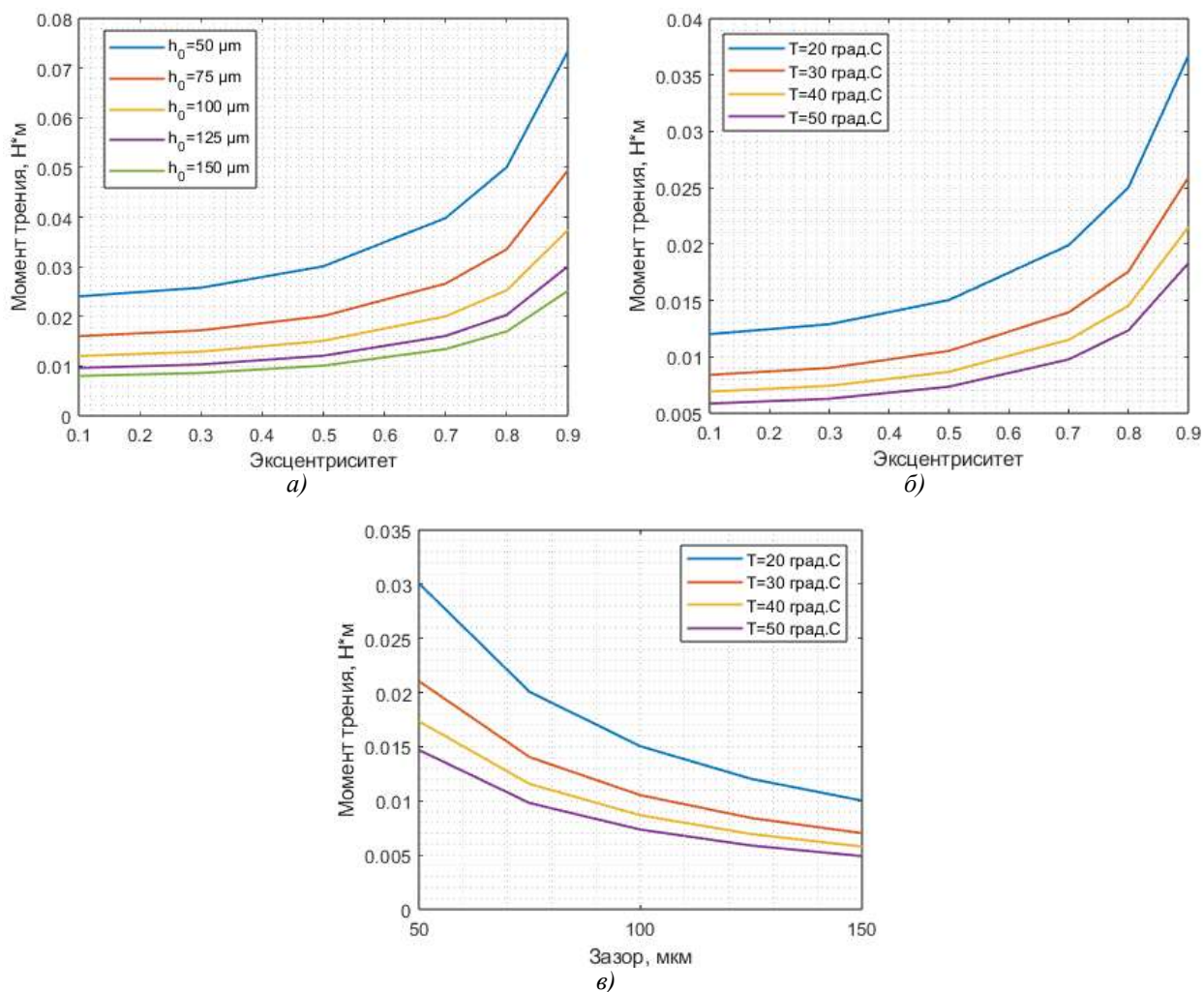


Рисунок 2 – Расчет значений момента трения КПЖТ при разных положениях ротора в опоре:  
а) расчетная сетка 33х33, б) расчетная сетка 53х73

На рисунке 2 представлено 3Д поле распределения момента трения в зависимости от положения ротора в опоре. Как видно из графиков, значение момента трения не изменяется по окружной координате, а зависит только от эксцентриситета ротора. С увеличением эксцентриситета значение момента трения значительно возрастает и имеет нелинейный характер роста. Точность расчета также сильно зависит от положения ротора. Видно, что на высоких эксцентриситетах она сильно падает, однако ее можно улучшить за счет увеличения размера конечно-разностной сетки.

Также на моменте трения значительно сказываются геометрические характеристики подшипников жидкостного трения и характеристики смазочного вещества. В результате был проведен ряд расчетов по определению зависимостей значения момента трения от среднего зазора и температуры смазочной жидкости (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Зависимость момента трения от эксцентриситета при разных значениях**  
 а) зазора, б) температуры, в) зависимость момента трения от зазора при разных значениях температуры

Графики на рисунке 3 показывают зависимость момента трения от эксцентриситета при разных значениях зазора (рисунок 3(а)) и температуры (рисунок 3(б)), а также зависимость момента трения от зазора при разной температуре (рисунок 3(в)). Из данных хорошо видно, что нелинейность функции момента трения от эксцентриситета имеет высокую нелинейность на больших значениях эксцентриситета. Также, с увеличением значения зазора смазочного слоя и температуры, момент трения значительно падает.

Как видно из рисунка 3(в), зависимости момента трения от зазора и температуры также не линейны. Однако, стоит отметить, что с увеличением зазора степень нелинейности падает и вклад влияния температуры на момент трения становится существеннее. В тоже время характер изменения момента трения от температуры связан с нелинейной зависимостью значения вязкости смазочной жидкости от этого параметра.

Кинематические характеристики также вносят существенный вклад в потери энергии на трение. Скорость вращения ротора является ключевым параметром, когда речь заходит о гидродинамическом подшипнике, которая не только влияет на основные интегральные характеристики опоры, а также является одним из основных факторов, определяющих степень всплытия ротора. Результаты расчета момента трения и потерь мощности в опоре при разных значениях скорости вращения ротора представлены на рисунке 4.

Графики на рисунке 4 показывают зависимости момента трения и потерь мощности при разных значениях скорости вращения ротора, которая варьировалась от 500 об/мин до 5000 об/мин. Видно, что с ростом скорости вращения момент трения и потери мощности возрастают. Стоит отметить, что функция потерь мощности имеет сильно нелинейный характер роста, тогда как функция момента трения имеет линейный вид роста с увеличением скорости вращения.

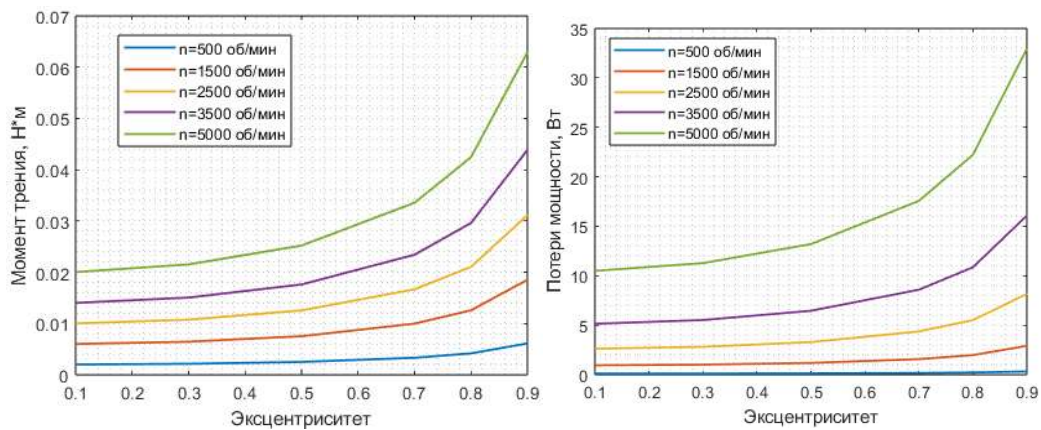


Рисунок 4 – Значения момента трения и потерь мощности при разных значениях скорости вращения ротора

Как было сказано ранее скорость вращения ротора влияет на степень его всплытия. Для оценки данного эффекта был проведен ряд вычислительных экспериментов по определению точек равновесия ротора при разных частотах его вращения. Результаты вычислений представлены на рисунке 5.

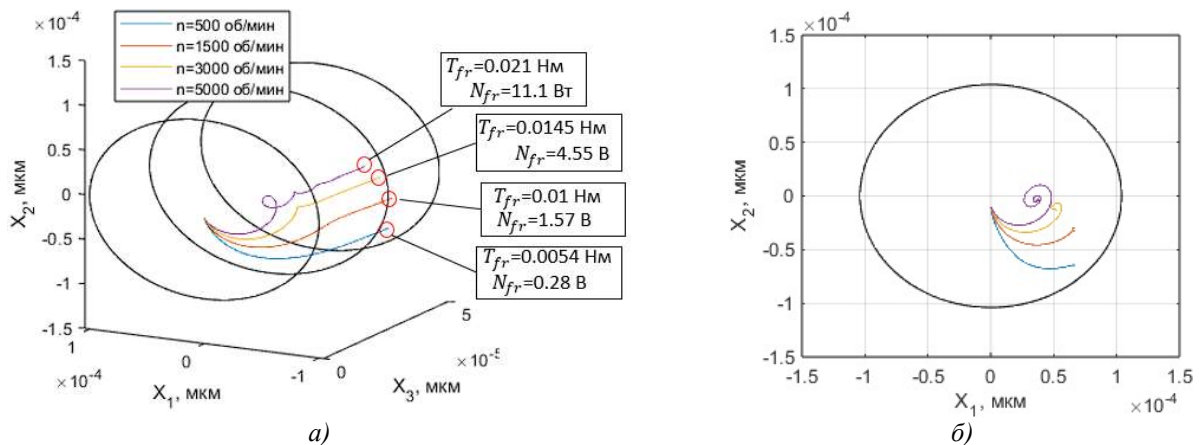


Рисунок 5 – Траектории движения и равновесные точки положения ротора в конической опоре жидкостного трения: а) трехмерные, б) в проекции на двухмерную плоскость

На рисунке 5 (а) представлены трехмерные траектории движения ротора без учета дисбаланса при разных значениях скорости вращения, а на рисунке 5 (б) их проекции на двухмерную плоскость. Из графиков видно, что с увеличением скорости вращения степень всплытия ротора значительно возрастает, причем данная зависимость не линейна и хорошо прослеживается на низких скоростях вращения. Также видно, что на высоких скоростях вращения ротору нужно больше времени для достижения точки равновесия, а его движение характеризуется достаточно высокой колебательностью. Это явление говорит о низкой стабильности системы с такими кинематическими параметрами. Значения момента трения и потерь мощности в точках равновесия значительно возрастают с ростом скорости. В тоже время, как было показано на рисунке 2, момент трения в центре подшипника имеет наименьшее значение момента трения. Отсюда можно сделать вывод, что достижение минимума момента трения за счет смещения равновесного положения ротора в центр подшипника, на базе регулирования скоростью его вращения является неоптимальной задачей. В тоже время, если режимы работы роторной машины характеризуются высокими скоростями вращения, то оптимальным решением будет выбирать наибольшую скорость, с учетом нелинейного характера изменения положения ротора с изменением скорости вращения, а также возникающие неустойчивости в области малых эксцентриситетов его положения.

### Заключение

Работа рассматривает вопросы расчета энергетических характеристик конических гидродинамических подшипников жидкостного трения. Представлена математическая модель

такой опоры на базе уравнения Рейнольдса в цилиндрических координатах. На базе описанной модели был проведен ряд вычислительных экспериментов по выявлению основных зависимостей момента трения от геометрических, кинематических и реологических параметров системы. Как показывают результаты моделирования, значение момента трения не изменяется по окружной координате, а зависит только от эксцентриситета ротора, а эта зависимость сильно не линейна на больших эксцентриситетах. Точность расчета также сильно зависит от положения ротора, на высоких эксцентриситетах она сильно падает, однако ее можно улучшить за счет увеличения размера конечно-разностной сетки. Увеличение значений зазора и температуры смазочной жидкости уменьшают значение момента трения, причем они имеют нелинейный характер изменений. Скорость вращения ротора является одним из ключевых кинематических параметров роторной системы. Из данных представленных в работе видно, что с увеличением скорости вращения степень всплывания ротора значительно возрастает, причем данная зависимость не линейна и хорошо прослеживается на низких скоростях вращения. Также видно, что на высоких скоростях вращения его движение характеризуется достаточно низкой стабильностью. Значения момента трения и потерь мощности в точках равновесия значительно возрастают с ростом скорости.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 22-19-00789, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00789/>.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Singh A., Sharma S.C. Behaviour of conical porous hybrid journal bearing operated with MHD lubricant considering influence of surface irregularities // Tribol. Int. - 2022. vol. 174.
2. Ingle R.B., Ahuja B.B. An experimental investigation on dynamic analysis of high speed carbon-epoxy shaft in aerostatic conical journal bearings // Compos. Sci. Technol. - 2006. vol. 66, no. 3–4, pp. 604–612.
3. Sharma S.C., Phalle V.M., Jain S.C. Performance analysis of a multirecess capillary compensated conical hydrostatic journal bearing // Tribol. Int. - 2011. vol. 44, no 5, pp. 617–626.
4. Sander D.E. et al. Simulation of journal bearing friction in severe mixed lubrication – Validation and effect of surface smoothing due to running-in // Tribol. Int. - 2016. vol. 96, pp. 173–183.
5. Shutin D., Kazakov Y. Theoretical and Numerical Investigation of Reduction of Viscous Friction in Circular and Non-Circular Journal Bearings Using Active Lubrication // Lubr. - 2023. vol. 11.
6. Li S. et al. Active hybrid journal bearings with lubrication control: Towards machine learning // Tribol. Int. - 2022. vol. 175(107805).
7. Mansoor Y., Shayler P. The effect of oil feed pressure on the friction torque of plain bearings under light, steady loads // Tribol. Int. - 2018. vol. 119, pp. 316–328.
8. Bouyer J., Fillon M. Experimental measurement of the friction torque on hydrodynamic plain journal bearings during start-up // Tribol. Int. - 2011. vol. 44, no. 7–8, pp. 772–781.
9. Wasilczuk M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings // Lubr. - 2015. vol. 3, no. 2, pp. 164–180.
10. Liu Y. et al. The Utilization of a Damping Structure in the Development of Self-Adaptive Water-Lubricated Stern Bearings // Lubr. - 2024, vol. 12, no. 2.
11. Ahmad M.A. et al. The Effects of Oil Groove Position on Torque and Frictional Force in Hydrodynamic Journal Bearing // Appl. Mech. - 2013. vol. 393, pp. 907–912.
12. Wang Z., Ye R., Xiang J. The performance of textured surface in friction reducing: A review // Tribol. Int. - 2023. vol. 177(108010).
13. Wang N., Ho C.L., Cha K.C. Engineering Optimum Design of Fluid-Film Lubricated Bearings // Tribology Transactions - 2008. vol. 43, no. 3, pp. 377–386.
14. Martin J.K., Parkins D.W. Testing of a Large Adjustable Hydrodynamic Journal Bearing // Tribol. Trans. - 2001. vol. 44, no. 4, pp. 559–566.
15. Zhang X. et al. Thiadiazole functionalized covalent organic frameworks as oil-based lubricant additives for anti-friction and anti-wear // Tribol. Int. - 2023. vol. 183(108393).
16. Knauder C. et al. Analysis of the Journal Bearing Friction Losses in a Heavy-Duty Diesel Engine // Lubr. - 2015. vol. 3, no. 2, pp. 142–154.
17. Nypan L.J. et al. Optimization of Conical Hydrostatic Bearing for Minimum Friction // J. Lubr. Technol. - 1972. vol. 94, no. 2, pp. 136–142.
18. Kazakov Y.N. et al. Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System // J. Tribol. - 2022. vol. 144, no. 8.
19. Kazakov Y.N. et al. Reducing Rotor Vibrations in Active Conical Fluid Film Bearings with Controllable Gap // Russian Journal of Nonlinear Dynamics - 2022. vol. 18, no. 5, pp. 863–873.

**Казakov Юрий Николаевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева», г Орёл  
Аспирант  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8 (4862) 41 98 49  
E-mail: kazakyurii@yandex.ru

KAZAKOV Yu.N.

## ENERGY CHARACTERISTICS OF CONICAL FLUID FILM BEARINGS

**Abstract.** *The paper considers the issues of calculating the energy characteristics of conical hydrodynamic fluid film bearings. A mathematical model of the support based on the Reynolds equation in cylindrical coordinates. The simulation results show that the value of the friction torque depends only on the rotor eccentricity, and this dependence is strongly nonlinear at large eccentricities. The calculation accuracy also strongly depends on the rotor position, but it can be improved by increasing the size of the finite-difference grid. An increase in the values of the clearance and temperature of the fluid film reduces the value of the friction torque, and they have a nonlinear nature of changes. The rotor speed is one of the key kinematic parameters of the rotor system. From the data presented in the paper it is evident that with an increase in the rotation speed, the fluid film thickness increases significantly, and this dependence is nonlinear and is clearly visible at low rotation speeds. The values of the friction torque and power losses at the equilibrium points increase significantly with increasing speed.*

**Keywords:** *conical fluid film bearings, energy characteristics, friction torque, modeling.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Singh A., Sharma S.C. Behaviour of conical porous hybrid journal bearing operated with MHD lubricant considering influence of surface irregularities // *Tribol. Int.* - 2022. vol. 174.
2. Ingle R.B., Ahuja B.B. An experimental investigation on dynamic analysis of high speed carbon-epoxy shaft in aerostatic conical journal bearings // *Compos. Sci. Technol.* - 2006. vol. 66, no. 3–4, pp. 604–612.
3. Sharma S.C., Phalle V.M., Jain S.C. Performance analysis of a multirecess capillary compensated conical hydrostatic journal bearing // *Tribol. Int.* - 2011. vol. 44, no 5, pp. 617–626.
4. Sander D.E. et al. Simulation of journal bearing friction in severe mixed lubrication – Validation and effect of surface smoothing due to running-in // *Tribol. Int.* - 2016. vol. 96, pp. 173–183.
5. Shutin D., Kazakov Y. Theoretical and Numerical Investigation of Reduction of Viscous Friction in Circular and Non-Circular Journal Bearings Using Active Lubrication // *Lubr.* - 2023. vol. 11.
6. Li S. et al. Active hybrid journal bearings with lubrication control: Towards machine learning // *Tribol. Int.* - 2022. vol. 175(107805).
7. Mansoor Y., Shayler P. The effect of oil feed pressure on the friction torque of plain bearings under light, steady loads // *Tribol. Int.* - 2018. vol. 119, pp. 316–328.
8. Bouyer J., Fillon M. Experimental measurement of the friction torque on hydrodynamic plain journal bearings during start-up // *Tribol. Int.* - 2011. vol. 44, no. 7–8, pp. 772–781.
9. Wasilczuk M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings // *Lubr.* - 2015. vol. 3, no. 2, pp. 164–180.
10. Liu Y. et al. The Utilization of a Damping Structure in the Development of Self-Adaptive Water-Lubricated Stern Bearings // *Lubr.* - 2024, vol. 12, no. 2.
11. Ahmad M.A. et al. The Effects of Oil Groove Position on Torque and Frictional Force in Hydrodynamic Journal Bearing // *Appl. Mech.* - 2013. vol. 393, pp. 907–912.
12. Wang Z., Ye R., Xiang J. The performance of textured surface in friction reducing: A review // *Tribol. Int.* - 2023. vol. 177(108010).
13. Wang N., Ho C.L., Cha K.C. Engineering Optimum Design of Fluid-Film Lubricated Bearings // *Tribology Transactions* - 2008. vol. 43, no. 3, pp. 377–386.
14. Martin J.K., Parkins D.W. Testing of a Large Adjustable Hydrodynamic Journal Bearing // *Tribol. Trans.* - 2001. vol. 44, no. 4, pp. 559–566.
15. Zhang X. et al. Thiadiazole functionalized covalent organic frameworks as oil-based lubricant additives for anti-friction and anti-wear // *Tribol. Int.* - 2023. vol. 183(108393).
16. Knauder C. et al. Analysis of the Journal Bearing Friction Losses in a Heavy-Duty Diesel Engine // *Lubr.* - 2015. vol. 3, no. 2, pp. 142–154.
17. Nypan L.J. et al. Optimization of Conical Hydrostatic Bearing for Minimum Friction // *J. Lubr. Technol.* - 1972. vol. 94, no. 2, pp. 136–142.
18. Kazakov Y.N. et al. Active Fluid-Film Bearing With Deep Q-Network Agent-Based Control System // *J. Tribol.* - 2022. vol. 144, no. 8.
19. Kazakov Y.N. et al. Reducing Rotor Vibrations in Active Conical Fluid Film Bearings with Controllable Gap // *Russian Journal of Nonlinear Dynamics* - 2022. vol. 18, no. 5, pp. 863–873.

**Kazakov Yuri Nickolaevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel

Postgraduate student

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

Ph. 8 (4862) 41 98 49

E-mail: kazakyurii@yandex.ru

БЕЛИКОВ Р.П., ПАРШУТИНА И.Г., ФИЛИППОВА-ГЛЕБОВА А.И., ЗЕЛЮКИН В.И.

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КОНЦЕПЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**Аннотация.** Энергетический переход согласно Энергетической стратегии до 2035 года подразумевает развитие распределенной энергетики, в том числе создание цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем. Цифровые интеллектуальные локальные энергетические системы позволяют достичь целей декарбонизации и доступности энергии в политике экологии, социальной политики и корпоративного управления. Рассмотрено состояние и перспективы развития локальных энергетических систем относительно доступности, устойчивости, самодостаточности, возможности осуществления и обоснованности проектов. Исследование основывалось на региональном масштабе с учетом инфраструктуры и территориального аспекта, на принципах социально-экономической и экологической выгоды. Изучение характеристики и проблем цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем позволило определить перспективы развития и группы показателей их эффективности и производительности. Полученные результаты позволяют оценить возможности электростанций малой мощности, которые включают все основные энергетические услуги: электроэнергию, тепло и сервисы хранения.

**Ключевые слова.** местные энергетические услуги, умные локальные энергетические системы, децентрализованная энергия, цифровизация энергетических систем, ESG политика.

### Введение

Реализация Энергетической стратегии до 2035 года трансформирует традиционные энергетические системы в направлении доступных и устойчивых локальных энергетических систем. Предъявляются требования использования информационно-цифровых и интеллектуальных технологий для мониторинга, контроля и аудита на этапах генерации, передачи, распределения, хранения и потребления электро- и теплоэнергии. Энергетическая доступность и устойчивость в условиях высокой изношенности электросетевой инфраструктуры и негативного влияния перекрестного субсидирования необходимы на местном локальном уровне для достижения целей децентрализации накопителей энергии и тепла, а также возобновляемой генерации для энергозависимого непрерывного производства.

Целью исследования является обоснование приоритетного направления трансформации и развития энергетической отрасли, включая цифровизацию, интеллектуализацию, децентрализованное управление локальных энергосистем.

### Основная часть

Несмотря на большое количество публикаций исследований [1, 4, 7, 10] по распределенной энергетике, цифровым энергетическим системам, децентрализованным энергосистемам и интеллектуальным местным энергетическим системам, выделим характеристику цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем. Энергетическая система как цепочка объединенных процессов или их часть от генерации, передачи, распределения, хранения и потребления электро- и теплоэнергии от разных как и низкоуглеродных/возобновляемых источников энергии на территории, обслуживает более одного здания, но менее целого района, которая использует цифровые и интеллектуальные системы/ технологии управления и оптимизации/мониторинга операций, либо для обозначения большей связности между системой в целом и ее пользователями. Цифровые интеллектуальные локальные энергетические системы способствуют достижению нескольких местных целей – надежный и устойчивый доступ к чистой энергии, дополняя централизованную архитектуру традиционной энергетической системы. Сформированный такими характеристиками энергетический проект делает его локально-местным и представляет возможность его тиражирования как с технической, технологической направленности, так и эколого-социальной направленности экономической политики местного управления (масштаб дополнения, возможность участия, распределение выгод) (таблица 1).

С развитием распределенной энергетики и распространением возобновляемых источников энергии энергосистема становится все более сложной в управлении и сталкивается с новыми проблемами – потребности производственных отраслей постоянно увеличиваются, в то время как мощности генерации и степень изношенности энергетических сетей увеличиваются. Чтобы справиться с большими объемами новой генерации и спроса,

энергетические системы должны стать цифровыми интеллектуальными и гибкими, что может быть обеспечено сочетанием гибкости со стороны предложения, хранения энергии, гибкого спроса и реагирования на спрос. Реагирующая гибкость может быть определена как изменение потребления или производства энергии, вызванное внешним сигналом с удаленного контроллера. Основными целями могут быть либо предотвращение локального сокращения централизованно поставляемой энергии, либо балансировка энергетической системы. Например, цифровые интеллектуальные локальные энергетические системы объединяет тепловые, энергетические и услуги хранения, адаптируются к местному контексту связывая генерацию со спросом производства, управления энергией и теплоэнергетические обмены, используя инновационные технологии, анализ больших данных, промышленный интернет вещей, аккумуляторные системы хранения, интеллектуального теплоснабжения.

Таблица 1 – Сравнение традиционной энергетической системы и цифровой интеллектуальной локальной энергетической системы [8]

Параметры	Традиционная энергетическая система	Цифровая интеллектуальная локальная энергетическая система
Поколение	Централизованная сеть	Децентрализованная сеть
Коммуникация	Односторонняя	Двухсторонняя
Взаимодействие	Ограниченное	В режиме реального времени
Измерение	Электромеханические счетчики	Цифровые счетчики
Операция	Ручные проверки и обслуживание оборудования	Удаленный мониторинг, аудит
Обслуживание	Сеть, управляемая централизованными сетевыми операторами	Распределенная энергетическая система, управляемая местной генерирующей организацией совместно с местным самоуправлением и сообществом
Управление потоком мощности	Ограниченное	Комплексное и автоматизированное
Надежность	Отказы оборудования, каскадные отключения	Автоматизировано, предотвращает отключения электроэнергии еще до их начала
Топология системы	Радиальная односторонняя система	Смешанная, несколькими путями
Распределенная генерация	Ограниченный доступ к сети	Полный доступ к сети

Проекты цифровых интеллектуальных энергетических систем на основе системного подхода в режиме реального времени позволяют контролировать потоки энергии с помощью сложных и специализированных информационно-коммуникационных технологий инфраструктуры диспетчерского управления и сбора данных местного производства электроэнергии, хранения и спроса на энергию. Это позволяет представить три варианта использования цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем [2, 9]. Первый – использование местных ресурсов для предотвращения сокращения централизованно поставляемой энергогенерации в условиях климатических изменений и бедствий, что приводит к потерям производственного и потребительского секторов. Второй – участие в механизме балансировки энергетической сети, используя цифровые интеллектуальные технологии для предотвращения дисбаланса между произведенной и потребленной энергией в определенный период времени. Третий – услуги частотной характеристики, которые заключаются в выделении определенного количества мощности для изменения производства или потребления электроэнергии в режиме реального времени в зависимости от отклонения частоты от ее номинального значения. Эти варианты использования предполагают возможности гидро-, солнце-, ветро-, водородных активов и активов хранения энергии с цифровой интеллектуальной возможностью управления.

Однако для реализации проектов цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем имеются препятствия [3, 11] (таблица 2).

Таблица 2 – Препятствия для реализации проектов цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем

№	Группы	Характеристика
1	Местные особенности	географические ограничения, нехватка первичных энергетических ресурсов, отсутствие крупных или группы потребителей
2	Финансовые затраты	капиталоемкие проекты с длинным сроком окупаемости, неопределенность будущей финансовой выгоды, будущие цены на энерго- и теплоснабжение, финансирование технического обслуживания
3	Социальные факторы	отсутствия осведомленности и понимания преимуществ таких проектов, демографическая структура территории, негативное восприятие технологических решений
4	Трудовые кадровые факторы	отсутствие подготовленных трудовых ресурсов для работы с инструментами цифровых технологий и интеллектуального управления
5	Технические барьеры	прерывистая генерация, например, ветровая или солнечная, хранение энергии, подключение к традиционной сети, неопределенность относительно производительности, кастомизация интеллектуальных технологий, многовекторная системная интеграция, интеллектуальное моделирование и анализ
6	Барьеры инфраструктуры энергосистемы	низкая надежность из-за изношенности, скачков напряжения или перегрузки кабеля, многовекторная системная интеграция, темпы цифровизации оборудования у потребителей
7	Правовые и политические факторы	нормативная база, политические инициативы, государственное регулирование и контроль

Отметим, что проекты цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем сталкиваются с этими барьерами на всех этапах жизненного цикла – планирования, проектирования, развертывания и эксплуатации. А разнообразие проектов по размеру, используемым технологиям, конфигурации системы, взаимодействию с уже существующими энергетическими системами и т. д. ограничивает повторяемость, требуя рассмотрения множества как технических, так и нетехнических вопросов.

Определение предпочтительного варианта проекта цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем должно основываться на показателях оценки эффективности для достижения энергетической надежности, устойчивости и доступности. Анализ исследований по реализации цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем [5, 6, 12] позволяет выделить группы показателей (таблица 3).

Подробное исследование показателей представляется необходимым для конкретных вариантов проекта цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем. Причем показатели могут быть нерепрезентативными для оценки и сравнения всех вариантов, поскольку отсутствуют широкая практика реализации проектов и временные данные исследований для сравнения в разных регионах.

Таблица 3 – Показатели оценки эффективности проектов цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем

№	Характеристика группы	Параметры
1	Экономические показатели включают оценки финансовых инвестиционных затрат и развития экономики территории.	Финансовые выгоды для потребителей электро- и теплоэнергии, цена единицы вырабатываемой электро- и теплоэнергии, объем инвестиций, срок окупаемости, количество новых местных организаций.
2	Энергетические показатели соответствуют этапам генерации передачи, распределения, хранения и потребления электро- и теплоэнергии.	Импорт/ экспорт энергии, энергетическая независимость, емкость локального хранилища, новые источники низкоуглеродной / возобновляемой энергии, потенциал гибкости, разнообразие технологий генерации, потребления и хранения, разнообразие схем генерации электро- и теплоэнергии, разнообразие местной структуры генерации и хранения электро- и теплоэнергии.

3	Экологические показатели оценивают воздействие на окружающую среду.	Выбросы CO <sub>2</sub> , шумовое загрязнение, влияние на биоразнообразие, использование земельных ресурсов, объемы финансирования восстановительных зеленых проектов, доля внедренных низкоуглеродных технологий.
4	Социальные показатели оценивают влияние на местное сообщество.	Процент организаций и других потребителей, участвующих в активном управлении электро- и теплоэнергией, количество созданных рабочих мест, количество новых неэнергетических услуг, количество инноваций и результатов интеллектуальной деятельности, кооперация организаций, местного самоуправления и органов власти.
5	Показатели устойчивости и надежности включает оценку сбоев системы, времени избыточной деятельности или простоя местных низкоуглеродных/ возобновляемых источников энергии.	Возможность дублирования/ дополнения генерации, распределения, хранения электро- и теплоэнергии, количество системных аварий, анализ причин отказов элементов систем электроэнергетики.
6	Факторы инфраструктуры соответствуют состоянию доступной инфраструктуры и возможностям развития цифровых интеллектуальных технологий в энергетических сетях.	степень изношенности, пропускная способность сетей, потери мощности системы, резервы мощности, резервы хранения электро- и теплоэнергии.
7	Факторы управления большими данными оценивают вычислительные ресурсы и цифровую инфраструктуру.	распределенное хранение данных, доля данных промышленного интернета вещей, связанность с цифровыми сервисами, покрытие сетей связи, мониторинг активов генерации и хранения электро- и теплоэнергии, цифровизация и автоматизация всех групп потребителей, кибербезопасность, локальное управление данными.
8	Факторы регулирования соответствуют уровню развития институциональной среды.	отношения собственности, правовое обеспечение, налоговое законодательство, администрирование, стандартизация.
9	Факторы тиражирования и репликации соответствуют возможностям будущих внедрений и информировать об успешных стратегиях.	коммуникация и публикации, открытый доступ к решениям, сайт и интернет сопровождение.

### **Заключение**

Исследуя развитие цифровизации и распределенной энергетики в статье было показано перспективное направление энергетической отрасли – цифровые интеллектуальные локальные энергетические сети, которые направлены на комплексное решение местных проблем электро- и теплоэнергетики. Большинство исследовательских работ были сосредоточены либо на технических, финансовых и социальных проблемах, связанных с успешной реализацией проектов. Децентрализованные формы энергетических систем объединяют генерацию, передачу, распределение, хранение и потребление электро- и теплоэнергетики для достижения доступности, устойчивости и самодостаточности территорий и производства. Хотя обозначены группы проблем и препятствий для реализации проектов цифровых интеллектуальных энергетических систем, современные технологии становятся все более совместимыми, что позволяет быстро использовать их в любой интегрированной энергетической системе. Основываясь на комплексном подходе к проблемам и перспективах цифровых интеллектуальных локальных энергетических систем выделим ценность проектов распределенной энергетики, направленных на реализацию низкоуглеродных технологий, повышая их экономическую, техническую и социальную

эффективность, оптимизацию управления потреблением электро- и теплоэнергии, формирование новых бизнес-моделей энергетической деятельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бык Ф.Л. Интеграция локальных интеллектуальных энергосистем и энергетический переход / Ф. Л. Бык, Л. С. Мышкина // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 94-го заседания Международного научного семинара, Алушта, 19–23 сентября 2022 года / Отв. редактор В.А. Стенников. Том Выпуск 73. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 31–40.
2. Бык Ф.Л. Повышение устойчивости энергоснабжения регионов на основе локальных интеллектуальных энергосистем / Ф. Л. Бык, Л. С. Мышкина, М. В. Кожевников // Экономика региона. – 2023. – Т. 19, № 1. – С. 163–177. – DOI 10.17059/ekon.reg.2023-1-13.
3. Кожевников, М. В. Институциональные барьеры развития малой энергетики России / М. В. Кожевников, А. А. Двинянинов, Н. Г. Сапожников // Journal of New Economy. – 2024. – Т. 25, № 1. – С. 38–47. – DOI 10.29141/2658-5081-2024-25-1-6.
4. Паршутина И.Г. Роль цифровой трансформации в формировании конкурентных преимуществ регенеративной экономики / И. Г. Паршутина, А. И. Филиппова-Глебова, О. А. Алексюткина // Наука, технологии, общество: Экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий : Сборник научных статей, Красноярск, 09–10 ноября 2023 года. – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, 2023. – С. 303–308.
5. Паршутина И.Г. Анализ влияния цифровизации и интернета вещей на производительность труда в экономике / И. Г. Паршутина, А. И. Солодовник, А. В. Амелина // Вестник аграрной науки. – 2023. – № 4(103). – С. 155–163. – DOI 10.17238/issn2587-666X.2023.4.155.
6. Регулирование напряжения с применением ресурсосберегающего источника энергии / И. Н. Фомин, Р. П. Беликов, Р. А. Булавинцев, В. А. Чернышов // Контроль качества продукции. – 2023. – № 8. – С. 54–56.
7. Couraud B. et al. Responsive FLEXibility: A smart local energy system //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Т. 182. – С. 113343.
8. Dong S. et al. Cybersecurity in smart local energy systems: requirements, challenges, and standards //Energy Informatics. – 2022. – Т. 5. – №. 1. – С. 9.
9. Fell M. J. et al. Smart local energy systems as a societal project: Developing a Theory of Change //Smart Energy. – 2023. – Т. 11. – С. 100109.
10. Improving the environmental management system to ensure sustainable development of the agricultural sector in a circular economy / A. I. Solodovnik, V. I. Savkin, O. V. Sidorenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2021 года. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 022038. – DOI 10.1088/1755-1315/981/2/022038.
11. Rae C., Kerr S., Maroto-Valer M. M. Upscaling smart local energy systems: A review of technical barriers //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Т. 131. – С. 110020.
12. Zhao N. et al. Emerging information and communication technologies for smart energy systems and renewable transition //Advances in Applied Energy. – 2023. – Т. 9. – С. 100125.

**Беликов Роман Павлович**

ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина»,  
г. Орел  
Зав. кафедрой электроснабжения  
302019, г. Орёл, Генерала Родина, 69  
E-mail: el-ogau@yandex.ru

**Филиппова-Глебова Александра Игоревна**

ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина»,  
г. Орел  
Доцент кафедры электроснабжения  
302019, г. Орёл, Генерала Родина, 69  
E-mail: a.filippova-glebova@mail.ru

**Паршутина Инна Григорьевна**

ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина»,  
г. Орел  
Профессор кафедры электроснабжения  
302019, г. Орёл, Генерала Родина, 69  
E-mail: parshutina@inbox.ru

**Зелюкин Василий Иванович**

ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина»,  
г. Орел  
Ст. преподаватель кафедры электроснабжения  
302019, г. Орёл, Генерала Родина, 69  
E-mail: zeви@rambler.ru

BELIKOV R.P., PARSHUTINA I.G., FILIPPOVA-GLEBOVA A.I., ZELYUKIN V.I.

## PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF DIGITAL INTELLIGENT LOCAL ENERGY SYSTEMS IN THE CONCEPT OF DISTRIBUTED ENERGY

**Abstract.** The energy transition according to the Energy Strategy until 2035 implies the development of distributed energy, including the creation of digital intelligent local energy systems. Digital intelligent local energy systems help achieve the goals of decarbonization and energy availability in environmental policy, social policy and corporate governance. The state and development prospects of local energy systems are considered in terms of

*availability, sustainability, self-sufficiency, feasibility and feasibility of projects. The study was based on the regional scale, taking into account the infrastructure and territorial aspect, on the principles of socio-economic and environmental benefits. The study of the characteristics and problems of digital intelligent local energy systems made it possible to determine the development prospects and groups of indicators of their efficiency and productivity. The results obtained make it possible to assess the capabilities of small-capacity power plants, which include all the main energy services: electricity, heat and storage services.*

**Keywords:** local energy services, smart local energy systems, decentralized energy, digitalization of energy systems, ESG policy.

## BIBLIOGRAPHY

1. Byk F.L. Integration of local smart power systems and energy transition / F. L. Byk, L. S. Myshkina // Methodological issues of studying the reliability of large energy systems: Proceedings of the 94th meeting of the International Scientific Seminar, Alushta, September 19-23, 2022 / Responsible. editor V.A. Stennikov. Volume Issue 73. - Irkutsk: Federal State Budgetary Scientific Institution L.A. Melentyev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2022. - P. 31-40.
2. Byk F.L. Improving the sustainability of regional energy supply based on local smart power systems / F. L. Byk, L. S. Myshkina, M. V. Kozhevnikov // Economy of the region. - 2023. - Vol. 19, No. 1. - P. 163-177. - DOI 10.17059/ekon.reg.2023-1-13.
3. Kozhevnikov, M. V. Institutional barriers to the development of small-scale energy in Russia / M. V. Kozhevnikov, A. A. Dvinyaninov, N. G. Sapozhnikov // Journal of New Economy. - 2024. - Vol. 25, No. 1. - P. 38-47. - DOI 10.29141/2658-5081-2024-25-1-6.
4. Parshutina I.G. The role of digital transformation in the formation of competitive advantages of a regenerative economy / I.G. Parshutina, A.I. Filippova-Glebova, O.A. Aleksyutkina // Science, technology, society: Ecological engineering in the interests of sustainable development of territories: Collection of scientific articles, Krasnoyarsk, November 9-10, 2023. - Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Regional House of Science and Technology of the Russian Union of Scientific and Engineering Public Associations, 2023. - P. 303-308.
5. Parshutina I.G. Analysis of the impact of digitalization and the Internet of Things on labor productivity in the economy / I.G. Parshutina, A.I. Solodovnik, A.V. Amelin // Bulletin of agrarian science. - 2023. - No. 4(103). - P. 155-163. - DOI 10.17238/issn2587-666X.2023.4.155.
6. Voltage regulation using a resource-saving energy source / I. N. Fomin, R. P. Belikov, R. A. Bulavintsev, V. A. Chernyshov // Product quality control. - 2023. - No. 8. - P. 54-56.
7. Couraud B. et al. Responsive FLEXibility: A smart local energy system //Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2023. - T. 182. - C. 113343.
8. Dong S. et al. Cybersecurity in smart local energy systems: requirements, challenges, and standards //Energy Informatics. - 2022. - T. 5. - №. 1. - C. 9.
9. Fell M. J. et al. Smart local energy systems as a societal project: Developing a Theory of Change //Smart Energy. - 2023. - T. 11. - C. 100109.
10. Improving the environmental management system to ensure sustainable development of the agricultural sector in a circular economy / A. I. Solodovnik, V. I. Savkin, O. V. Sidorenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2021 года. - Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. - P. 022038. - DOI 10.1088/1755-1315/981/2/022038.
11. Rae C., Kerr S., Maroto-Valer M. M. Upscaling smart local energy systems: A review of technical barriers //Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2020. - T. 131. - C. 110020.
12. Zhao N. et al. Emerging information and communication technologies for smart energy systems and renewable transition //Advances in Applied Energy. - 2023. - T. 9. - C. 100125.

### **Belikov Roman Pavlovich**

Orel State Agrarian University present name N.V. Parakhin  
Head of the Department of Power Supply  
302019, Orel, Rodina str., 69  
E-mail: el-ogau@yandex.ru

### **Parshutina Inna Grigorievna**

Orel State Agrarian University present name N.V. Parakhin  
Professor of the Department of Power Supply  
302019, Orel, Rodina str., 69  
E-mail: parshutina@inbox.ru

### **Filippova-Glebova Aleksandra Igorevna**

Orel State Agrarian University present name N.V. Parakhin  
Associate Professor of the Department of Power Supply  
302019, Orel, Rodina str., 69  
E-mail: a.filippova-glebova@mail.ru

### **Zelyukin Vasily Ivanovich**

Orel State Agrarian University present name N.V. Parakhin  
Senior Lecturer of the Department of Power Supply  
302019, Orel, Rodina str., 69  
E-mail: zevi@rambler.ru

МАРКОВ В.В., УГЛОВА Н.В.

## ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ О ПРИЧИНАХ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** Сформулирована актуальность проблемы обработки информации о несоответствующей продукции и о качестве годных изделий при производстве электрооборудования. Показано, что широкому внедрению методов управления качеством в электротехническом производстве препятствует чрезвычайно большой объём информации, к которому можно применить термин «большие данные». Представлен один из возможных подходов к автоматизации процедуры математической обработки статистической информации о несоответствующей продукции и о качестве годных изделий при производстве электрооборудования. Даны рекомендации по применению результатов статистического анализа готовой продукции для выявления причин дефектов электрооборудования и оценки качества технологических процессов его производства. Особое внимание уделено простым статистическим инструментам управления качеством, таким, как контрольный лист, диаграмма Парето, диаграмма причин и следствий, гистограмма. Показан принципиально новый подход к оформлению диаграммы стратификации, который позволяет объединить несколько видов статистических инструментов управления качеством продукции в единую прикладную методику анализа больших данных.

**Ключевые слова:** машиностроение; приборостроение; электротехническое производство; качество; статистические методы управления качеством; большие данные; электрооборудование; диаграмма разброса

### Введение

В связи с возросшей потребностью предприятий электротехнической промышленности в отечественной элементной базе (далее – электрорадиоэлементах) региональные предприятия начинают получать крупные заказы на электрорадиоэлементы. Препятствием для выполнения таких крупных заказов является неготовность региональных предприятий в выполнении требований предприятий электротехнической промышленности в части внедрения у поставщиков методики 8D и демонстрации использования статистических методов управления качеством продукции при проведении причинно-следственного анализа корневых причин дефектов электрорадиоэлементов [1]. Актуальной проблемой увеличения объёмов производства и количества рабочих мест на региональных предприятиях является приобретение работниками предприятий опыта использования статистических методов управления качеством продукции при проведении причинно-следственного анализа причин дефектов электрооборудования и входящих в его состав электрорадиоэлементов [2].

Целью работы является рассмотрение возможности применения статистических методов для обработки больших массивов данных о видах и количестве несоответствующих и годных серийных изделий при производстве электрооборудования и комплектующих электрорадиоэлементов, на примере производства электрических соединителей.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: составлен обзор цифровых технологий обработки больших данных о несоответствующей продукции и годных изделиях; рассмотрены особенности производства электрорадиоэлементов с точки зрения объёма данных для анализа несоответствующей продукции; составлено описание процесса применения статистических методов для анализа причин возникновения несоответствующей продукции и управления качеством электрорадиоэлементов.

### Методика анализа данных о несоответствующей продукции

Рассмотрим последовательность применения цифровых технологий обработки больших данных на примере производства электрических соединителей, которое можно отнести к типичному представителю электрооборудования. В качестве образца продукции рассмотрим изделие «Соединитель электрический СНП-XXX», как одно из основных видов продукции предприятий по производству электрических соединителей [3]. Первым этапом управления качеством продукции является сбор исходных данных о состоянии производства. Эффективным инструментом сбора данных является контрольный лист [3]. С целью автоматизации процесса сбора, обработки и хранения исходных данных рабочее место

технического контролёра должно быть оснащено портативным компьютером с программным обеспечением в виде электронных таблиц с бесконечным количеством строк.

В программное обеспечение загружаются формулы расчёта доли ( $D_i$ ) и накопленной доли ( $DN_i$ ) изделий с дефектами каждого вида:

$$D_i = \frac{n_i}{N} \cdot 100\%; DN_i = \sum_{i=1}^k (D_i + D_{i-1} + D_{i-2} + \dots), \quad (1)$$

где  $n_i$  – количество изделий с дефектами  $i$ -того вида ( $i = 1 \dots k$ ), шт.;  
 $N$  – суммарное количество дефектов по всем изделиям в проверенной выборке, шт.;  
 $k$  – количество видов дефектов изделия, отмеченное в контрольном листе, шт.

По данным контрольного листа и в программном обеспечении, адаптированном под задачи технического контролёра оформляется диаграмма Парето [3-5] (рисунок 1, а), на которой по оси абсцисс откладываются наименования видов дефектов изделия. По оси ординат откладываются два вида значений: процентная доля по каждому виду дефектов и накопленная доля по всем видам дефектов, начиная с первого вида дефектов.

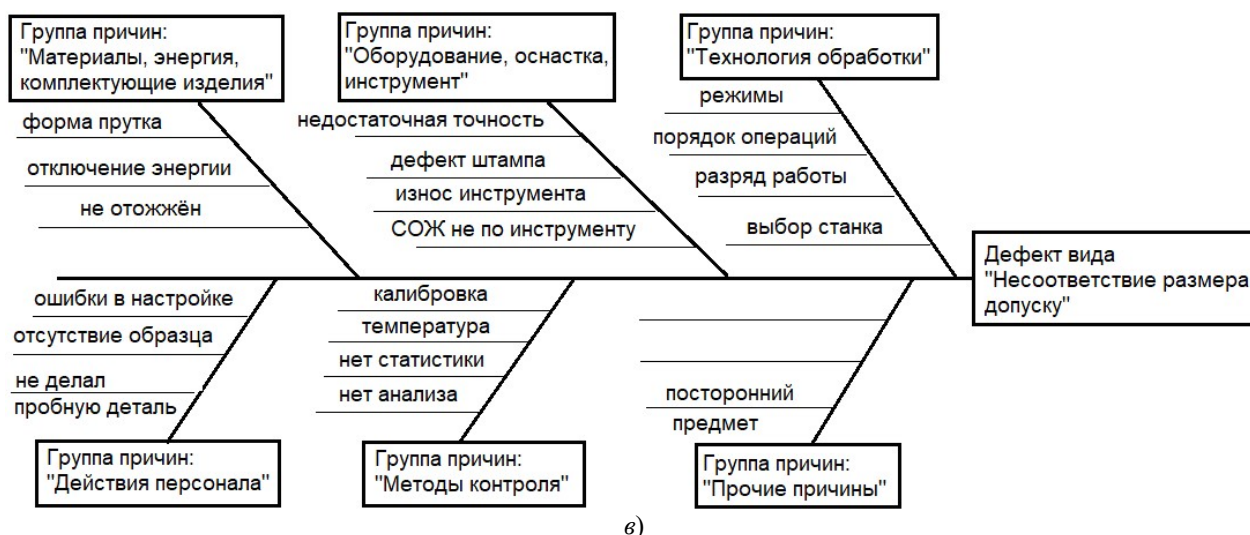
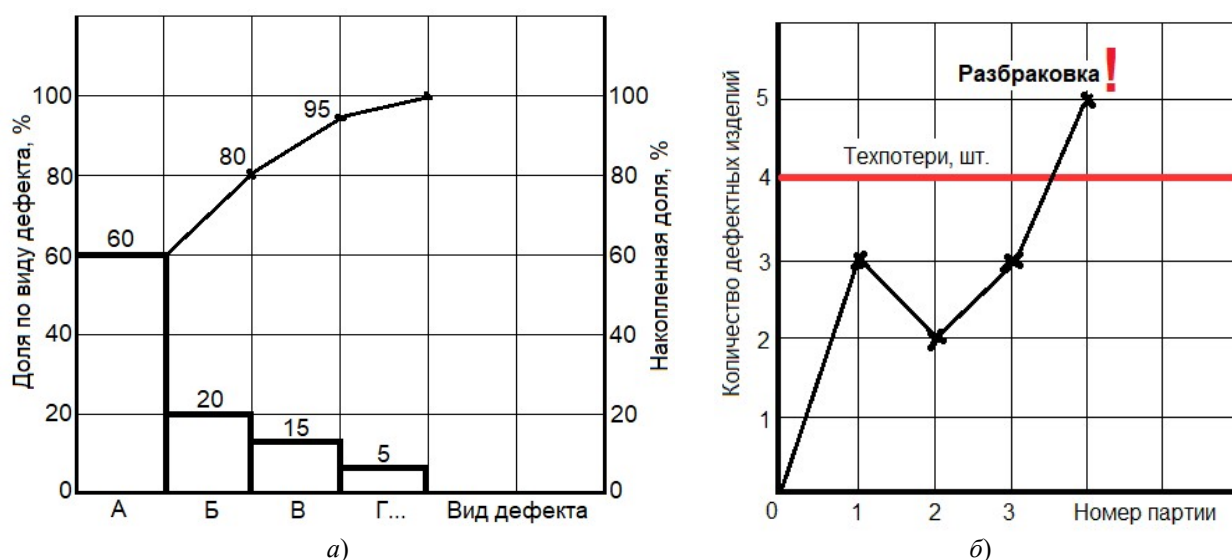


Рисунок 1 – Примеры оформления статистических инструментов анализа дефектов и причин их возникновения: диаграмма Парето (а), контрольная N-карта (б), диаграмма Исикавы (в)

Диаграмма Парето составляется в том случае, если технологические потери в партии изделий больше допустимого значения, что отмечается на бланке контрольной карты количества дефектных изделий (N-карта), как показано на рисунке 1, б. Виды дефектов,

отмеченные на диаграмме Парето, слажут исходной информацией для выявления возможных причин возникновения дефектов, которые отмечаются на диаграмме Исикавы (рисунок 1, в).

### Описание подхода к оформлению диаграммы разброса

Диаграмма Исикавы по потенциальным причинам дефектов изделия, виды которых отмечены на диаграмме Парето, строится по результатам «мозгового штурма» при проведении совещания по причинам дефектов изделия, поэтому она может содержать очень большое количество причин дефектов, многие из которых могут не оказывать существенного влияния на возникновение дефектов. Поэтому после составления диаграммы Исикавы эксперты совещания по причинам дефектов изделия должны обсудить степень влияния каждой указанной в диаграмме Исикавы причины на результат (возможность возникновения дефекта конкретного вида) и из всех отмеченных причин дефектов выбрать не более пяти причин с наиболее сильным влиянием на дефекты изделия. Результат отбора ограниченного количества причин дефектов с наиболее сильным влиянием на дефекты изделия оформляется диаграммой разброса, форма и пример заполнения которой показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Форма и пример заполнения диаграммы разброса (в сокращении)

Группа причин дефектов	Формулировка причины дефекта	Кто предложил (ФИО, должность)	Степень влияния причины на дефект
Материалы, энергия и комплектующие изделия	Форма прутка	Инженер-конструктор изделия, ФИО	<b><u>Сильное влияние</u></b>
	Отключение энергии	Зам. начальника цеха по подготовке производства, ФИО	Нет
	Пруток не отождён	Инженер-технолог цеха, ФИО	Слабое влияние
Оборудование, оснастка и инструмент	Недостаточная точность токарного автомата	Инженер-технолог цеха, ФИО	<b><u>Сильное влияние</u></b>
	Дефект формообразующих деталей штампа	Инженер-технолог цеха, ФИО	Слабое влияние
	Неучтённый при наладке станка износ инструмента	Зам. начальника цеха по подготовке производства, ФИО	Нет
	Используемая СОЖ не соответствует инструменту	Зам. начальника цеха по подготовке производства, ФИО	Нет
Технология обработки	Не обоснованы режимы резания	Инженер-технолог цеха, ФИО	Слабое влияние
	Порядок операций в маршруте может вызвать деформацию поверхности детали	Инженер-технолог цеха, ФИО	<b><u>Сильное влияние</u></b>
Эксперты (подписи): _____ Лидер команды 8D (подпись): _____ Дата составления диаграммы: _____			

Заполненная диаграмма разброса служит исходной информацией для изучения причин с сильным влиянием на дефекты изделия с целью определения основной причины возникновения дефектов и назначения окончательных корректирующих действий.

### Методика анализа качества серийных изделий

Первым этапом анализа качества серийных изделий статистическими методами является сбор исходных данных о состоянии производства. Эффективным инструментом

сбора данных является контрольный лист для количественной информации, примерная форма которого представлена в таблице 2 [3].

Таблица 2 – Форма контрольного листа и пример его заполнения

Изделие: Соединитель электрический СНП-XXX Объем выборки для контроля: 100 шт. Контролируемый размер: наружный диаметр штыря $\varnothing 10_{-0,2}$ мм. Допустимые технологические потери в объеме выборки, (% , шт.): 5%, 5 шт. Сдал: оператор технологической линии №1, смена №1 (ФИО, электронная подпись) Проверил: технический контролёр ОТК, смена №1 (ФИО, электронная подпись) Дата: XX.XX.2024			
Интервал значений контролируемого размера изделия	Значение размера, мм	Количество, шт.	Частота попадания размеров в интервал значений
От 9,80 до 9,84 мм	9,81	1	0,056
Свыше 9,84 до 9,88 мм	9,85; 9,86; 9,86	3	0,167
Свыше 9,88 до 9,92 мм	9,89; 9,90; 9,90; 9,90; 9,91; 9,92; 9,90; 9,90	8	0,444
Свыше 9,92 до 9,96 мм	9,93; 9,94; 9,95; 9,95	4	0,222
Свыше 9,96 до 10,00 мм	9,98; 9,98	2	0,111
Сумма:		18	1,0

С целью автоматизации процесса сбора, обработки и хранения исходных данных рабочее место контролёра ОТК должно быть оснащено портативным компьютером с программным обеспечением в виде электронных таблиц с бесконечным количеством строк.

В программное обеспечение загружаются формулы расчёта частоты попадания размеров изделия в интервал значений [3]:

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \quad (2)$$

где  $p_i$  – частота попадания размеров изделия в  $i$ -тый интервал значений;  
 $n_i$  – количество изделий в  $i$ -том интервал значений, шт.;  
 $N$  – общее количество изделий в контролируемой выборке, шт.

По данным контрольного листа и в программном обеспечении, адаптированном под задачи технического контролёра оформляется гистограмма (рисунок 2), на которой по оси абсцисс откладываются интервалы размеров изделия, а по оси ординат – частота попадания размеров изделия в соответствующий интервал значений.

По данным контрольного листа для количественной информации определяется четыре статистических показателя контролируемой выборки изделий [4, 5]:

- 1) вид закона распределения контролируемого параметра;
- 2) среднее арифметическое значение контролируемого параметра ( $d_{cp}$ );
- 3) среднеквадратическое отклонения контролируемого параметра ( $S_d$ );
- 4) индекс пригодности технологического процесса ( $p_k$ ).

Ниже представлены формулы для расчёта количественных показателей качества выборки, а также стабильности, настроенности и точности технологического оборудования, применяемого для изготовления изделий:

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}; S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{cp})^2}{n - 1}}; p_k = \frac{Td}{2 \cdot S_d}, \quad (3)$$

где  $d_i$  – измеренное значение размера  $i$ -того изделия в контролируемой выборке, мм;  
 $n$  – количество изделий в контролируемой выборке, шт.;  
 $Td$  – допуск размера изделия в контролируемой выборке, мм.

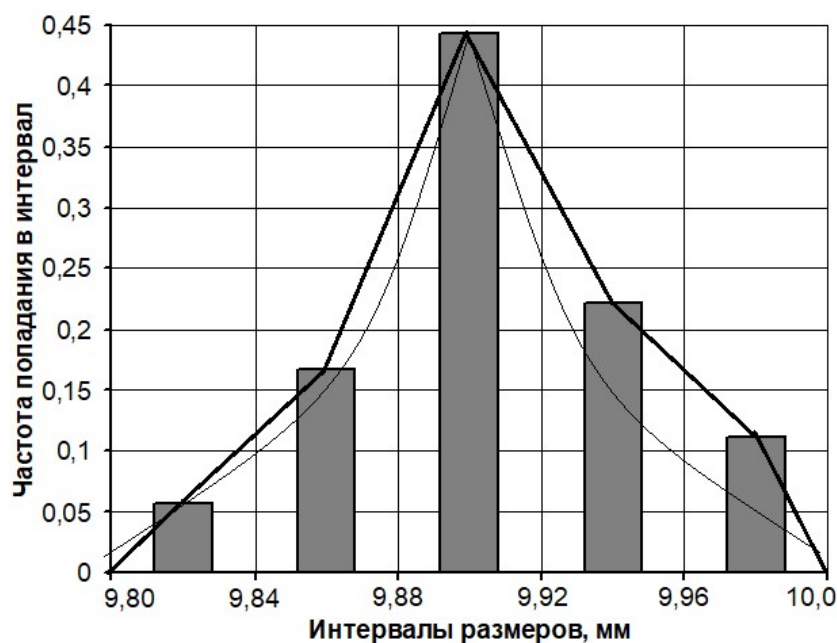


Рисунок 2 – Пример построения гистограммы

Рассмотрим сущность каждого из статистических показателей выборки.

Вид закона распределения параметра позволяет оценить устойчивость процесса изготовления изделия – при нормальном законе распределения параметра технологический процесс считается устойчивым, что указывает на *стабильность технологического процесса*.

Среднее арифметическое значение в сопоставлении с серединой поля допуска параметра позволяет оценить правильность настройки оборудования, что указывает на *настроенность технологического процесса*.

Среднеквадратическое отклонение параметра показывает точность оборудования, что является показателем *точности технологического процесса*. Индекс пригодности является оценкой потенциально возможной доли несоответствующей продукции при реализации технологического процесса изготовления изделия. В частности, если  $p_k = 2$ , доля изделий с дефектами может составлять 5 % от всего объема партии изделий, а при  $p_k = 3$ , доля изделий с дефектами уменьшается до 0,27 % от всего объема партии изделий.

### Заключение

Применение статистических инструментов анализа качества продукции сдерживается очень большим объемом данных, которые надо постоянно собирать, хранить и обрабатывать, причём регулярно, для каждой партии изделий, каждого работника и каждой единицы технологического оборудования. Для автоматизации работы технического контролёра с большими данными необходима автоматизация его рабочего места, которая позволит освободить его от монотонного труда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ефимов, В.В. Статистические методы в управлении качеством продукции: Учебное пособие / В.В. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2023. – 138 с.
- 2 Контрольные листки [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://studfile.net/preview/9547503/page:4>.
- 3 Диаграмма Парето [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://studfile.net/preview/5429943/page:28>.
- 4 Причинно-следственная диаграмма Исикавы [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.forpm.ru/?ysclid=lq45n3jww0115838722>.
- 5 Джордж, Л.М. Бережливое производство + шесть сигм / Л.М. Джордж; Пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2015. – 360 с.

**Марков Владимир Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой приборостроения, метрологии и сертификации ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева». 302026, г. Орел, 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 им. И.С. Тургенева». 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел.: 8-906-655-28-11  
E-mail: uglova.n.v.@yandex.ru

MARKOV V.V., UGLOVA N.V.

## APPLICATION OF STATISTICAL TOOLS OF PRODUCT QUALITY MANAGEMENT IN CONDUCTING BIG DATA ANALYSIS ON THE CAUSES OF ELECTRICAL EQUIPMENT DEFECTS

**Abstract.** *The relevance of the problem of processing information on non-conforming products and on the quality of good products in the production of electrical equipment is formulated. It is shown that the widespread implementation of quality management methods in electrical engineering production is hampered by an extremely large volume of information, to which the term "big data" can be applied. One of the possible approaches to automating the procedure for mathematical processing of statistical information on non-conforming products and on the quality of good products in the production of electrical equipment is presented. Recommendations are given for the application of the results of statistical analysis of finished products to identify the causes of defects in electrical equipment and assess the quality of technological processes for its production. Particular attention is paid to simple statistical tools for quality management, such as a checklist, Pareto chart, cause and effect diagram, and histogram. A fundamentally new approach to the design of a stratification diagram is shown, which allows combining several types of statistical tools for product quality management into a single applied technique for analyzing big data.*

**Keywords:** *mechanical engineering; instrument making; electrical engineering; quality; statistical methods of quality management; big data; electrical equipment; scatter diagram*

### BIBLIOGRAPHY

- 1 Podmasterev, K.V. Electroparametric methods of complex diagnostics of rolling bearings / K.V. 1 Efimov, V.V. Statistical methods in product quality management: Textbook / V.V. Efimov. - Ulyanovsk: UISTU, 2023. - 138 p.
- 2 Checklists [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://studfile.net/preview/9547503/page:4>.
- 3 Pareto diagram [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://studfile.net/preview/5429943/page:28>.
- 4 Ishikawa cause-and-effect diagram [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://www.forpm.ru/?ysclid=lq45n3jww0115838722>.
- 5 George, L.M. Lean Six Sigma / L.M. George; Transl. from English. – Moscow: Alpina Business Books, 2015. – 360 p.

**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., Oryol, 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., Oryol, 302026.  
Phone.: 8-906-655-28-11  
E-mail: uglova.n.v.@yandex.ru

© Марков В.В., Углова Н.В., 2025

ПОДМАСТЕРЬЕВ К.В., МАРКОВ В.В.

## КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УЗЛА ТРЕНИЯ В ВИДЕ СОВОКУПНОСТИ ФРИКЦИОННЫХ КОНТАКТОВ

**Аннотация.** *Представлены результаты математического моделирования электрического сопротивления узла трения, в основу которого положено представление об узле трения, как о совокупности фрикционных контактов. При этом геометрическая форма фрикционных контактов задана в зависимости с типовыми схемами контактирования поверхностей деталей узла трения. В основу математической модели электрического сопротивления фрикционного контакта положено представление о возможности моделирования высоты микронеровностей рабочих поверхностей деталей узла трения через теорию случайного поля. Предлагаемый подход к моделированию электрического сопротивления узла трения расширяет известную теорию диагностирования опор качения электропараметрическими методами в области применения для других видов деталей машин.*

**Ключевые слова:** *узел трения; фрикционный контакт; диагностирование; электрическое сопротивление; электрорезистивный метод; теория случайного поля; опора качения.*

### Введение

Узлы трения машин и приборов являются одними из наиболее нагруженных и ответственных элементов и часто определяют показатели надёжности и безопасности изделия в целом, поэтому техническое диагностирование, контроль и оценка показателей их фактического состояния входят в состав мероприятий, с помощью которых обеспечивается безопасность технологических комплексов, транспортных систем и других ответственных изделий. При этом особую актуальность приобретают методы оценки фактического состояния объекта в процессе его эксплуатации – методы функциональной диагностики и неразрушающего контроля, обеспечивающие возможность создания встроенных инструментальных систем, предотвращающих аварийные отказы ответственных объектов с риском для жизни и здоровья людей, с большими экономическими потерями.

Для получения объективной информации о состоянии узлов трения могут использоваться различные диагностические параметры, реализующие электрические, кинематические, вибрационные, тепловые или другие методы и обеспечивающие возможность неразрушающего контроля трибосопряжений. Следует отметить при этом, что, обладая рядом преимуществ и недостатков, каждый из методов, реализующий какой-либо диагностический параметр в отдельности, не позволяет получить полных и однозначных данных о состоянии узла трения, а только дают некоторую оценку сложным трибологическим процессам, и при решении той или иной диагностической задачи для конкретного объекта является более или менее приемлемым. В связи с этим актуальность задачи разработки и совершенствования объективных инструментальных методов функциональной диагностики узлов трения, поиска наиболее информативных диагностических параметров и подходов к их комплексированию с целью получения наиболее достоверной информации о состоянии объекта остается высокой.

Одними из наиболее эффективных методов в данной предметной области являются электрические методы, в частности электрорезистивные, основанные на использовании в качестве диагностических параметров различных характеристик флуктуирующего электрического сопротивления трибосопряжения [1, 2]. Их преимущества заключаются в том, что объективная информация о состоянии объекта в реальных режимах и условиях работы может быть получена непосредственно из зоны трения, а её носителем будет электрический сигнал, который можно привести к форме, удобной для анализа и преобразования. Причём изменения характера флуктуаций электрического сопротивления проявляются существенно раньше изменений тепловых, вибрационных или кинематических параметров объекта [2], что

делает эти методы наиболее чувствительными к изменению состояния объекта.

Электрорезистивные методы в настоящее время наиболее глубоко разработаны и получили наибольшее распространение для контроля технического состояния подшипников качения [1 - 4], но, учитывая их универсальный характер, актуальной задачей развития теории неразрушающего контроля машин и приборов может стать распространение данных методов и на другие изделия, содержащие узлы трения. Очевидно, что для синтеза наиболее информативных диагностических параметров при решении конкретных задач оценки состояния конкретных объектов необходимо проведение теоретических исследований. А для этого в каждом случае нужно иметь математическую модель объекта контроля, вскрывающую связь его внутренних параметров, характеристик используемых конструкционных и смазочных материалов, режимов и условий эксплуатации со значением электрического сопротивления объекта.

*Целью данной работы* является описание возможного подхода к математическому моделированию электрического сопротивления узла трения произвольного изделия в виде совокупности фрикционных контактов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: обоснованы допущения, принятые при моделировании электрических свойств узла трения; составлена математическая модель сопротивления отдельного фрикционного контакта; показан переход от сопротивления фрикционного контакта к сопротивлению узла трения; представлен контрольный пример моделирования.

#### **Допущения, принятые при моделировании**

В соответствии с теорией электропроводности, электрическое сопротивление является физической величиной, определяющей способность материала препятствовать протеканию через него электрического тока. Причем при протекании постоянного тока электрическое сопротивление будет чисто активным, а при протекании переменного тока – полным электрическим сопротивлением, которое часто называется импедансом. Значение активного электрического сопротивления тела зависит от геометрических размеров и внутренних свойств материала, которые определяют значение удельного сопротивления. Можно сделать вывод, что электрическое сопротивление контакта поверхностей деталей узла трения, как диагностический признак, характеризует геометрические параметры и внутренние свойства трибологической системы фрикционного контакта при реализации процедуры измерений.

Известные подходы к математическому описанию электрического сопротивления узла трения [1-4] позволяют получить математическую модель электромеханических процессов в зоне трения в виде комбинации известной теории контакта реальных поверхностей деталей машин и теории электрической проводимости контакта двух тел, на поверхностях которых имеются микронеровности [5-9]. На основании анализа известных теорий [1-9] при моделировании электрических свойств узла трения приняты допущения:

- математическое описание микронеровностей поверхностей деталей узла трения осуществляется с помощью случайной функции распределения материала по выступам микронеровностей;
- единичная микронеровность моделирована сферическим сегментом;
- деформация поверхностей при фрикционном взаимодействии описана с помощью теории Герца для условий упругого контакта микронеровностей;
- математическое описание случайного распределения высоты микронеровностей выполнено с помощью распределения Найака, с учётом его предельных состояний;
- при учёте параметров шероховатости поверхностей деталей узла трения используется известная схема контакта шероховатой поверхности с гладкой поверхностью, причём параметры шероховатой поверхности приводятся к двум реальным поверхностям;
- гироскопические и центробежные эффекты, а также эффекты проскальзывания тел относительно друг друга в модели не учитываются.

Перечисленные допущения положены в основу модели электрического сопротивления отдельного фрикционного контакта, математическое описание которой представлено ниже.

### Моделирование электрического сопротивления фрикционного контакта

Фрикционный контакт является достаточно сложной физической системой, так как в нём происходит взаимодействие поверхностей деталей узла трения, смазочного материала, а также очень сложных структур на их границах, которые непрерывно изменяются при работе узла трения. Основным фактором, определяющим пределы диапазона возможных значений электрического сопротивления узла трения, является наличие смазочного материала в зоне трения. Здесь возможно два крайних случая: наличие смазочного материала и его отсутствие. При наличии смазочного материала в количестве, достаточном для устойчивого разделения поверхностей деталей узла трения (жидкостная смазка), сопротивление контакта будет определяться сопротивлением смазочной плёнки, характерным для её различных видов ( $R_{сп}$ ), а при отсутствии – сопротивлением материалов деталей узла трения, которое в научной литературе принято называть сопротивлением стягивания ( $R_{ст}$ ). При таком подходе математическая модель фрикционного контакта будет иметь вид:

$$\begin{cases} R_{ст} = \frac{\rho}{2 \cdot N \cdot r_k}, \text{ при } h_0 < 3 \text{ нм}; R_{сп} = \frac{\rho_{пов}}{\pi \cdot N \cdot r_k^2}, \text{ при } 3 \leq h_0 < 10 \text{ нм}; \\ R_{сп} = \rho_{гп} \cdot \frac{h_0}{S_h}, \text{ при } 0,01 \leq h_0 < 1 \text{ мкм}; R_{сп} = \rho_{см} \cdot \frac{h_0}{S_h}, \text{ при } 1 \leq h_0 \leq 30 \text{ мкм} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $\rho_{пов}$ ,  $\rho_{гп}$ ,  $\rho_{см}$  – соответственно, удельное электрическое сопротивление материалов деталей узла трения, поверхностной плёнки, граничной пленки и смазочного материала;

$h_0$  – наименьшая толщина смазочной пленки в зоне трения;

$S_h$  – площадь одного пятна контакта деталей узла трения;

$r_k$  – радиус одного пятна металлического контакта деталей узла трения;

$N$  – количество пятен металлического контакта деталей узла трения.

Как видно из блока формул (1), наибольшую сложность в моделировании представляет описание сопротивления тонких смазочных плёнок – так называемых поверхностной плёнки и граничной плёнки. Поверхностная плёнка образуется в результате диффузии материалов деталей узла трения и их оксидов со смазочным материалом, а сопротивление формируется в процессе сложных туннельных эффектов в зоне трения. Граничная плёнка – это локальные участки смазочного материала, прерывающиеся вершинами наиболее высоких неровностей микрорельефа поверхностей деталей узла трения, моделирование которой возможно либо с помощью теории вероятностей, либо эмпирическими статистическими данными.

Подход к моделированию и структура предлагаемой математической модели электрического сопротивления фрикционного контакта подробно рассмотрены в работе [4]. Развитие данной модели производится в направлении учёта геометрических параметров контактирующих поверхностей деталей узла трения.

Геометрические параметры контактирующих поверхностей деталей узла трения могут иметь случайную и систематическую составляющие. Случайная составляющая геометрии поверхностей может формироваться при изготовлении деталей узла трения (шероховатость), а также при повреждениях в процессе эксплуатации или хранения (локальные дефекты). Систематическая составляющая также может формироваться при изготовлении деталей узла трения вследствие влияния показателей точности обрабатывающего оборудования, но чаще формируется при сборке механизма в виде макроотклонений геометрии поверхностей.

Для описания шероховатости поверхностей деталей узла трения в модели использовано случайное распределение Найака [5]. Отклонения макрогеометрии деталей учтены в модели с помощью теории гармонического анализа [10]. Локальные дефекты поверхностей деталей заданы полиномом Чебышева [11].

Основные теоретические зависимости предлагаемой авторами уточнённой математической модели электрического сопротивления фрикционного контакта рабочих поверхностей деталей узла трения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Математическое описание электрического сопротивления отдельного фрикционного контакта

Граничная смазка	Смешанная смазка	Номер ф-лы
$R_{ст} = a_R \cdot \Psi_R(h)$	$R_{сп} = \alpha_{см} \cdot R_{ст}; \alpha_{см} = \frac{\rho_{см}}{\rho_m} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r}$	(2)
$a_R = \frac{\rho_m}{2N\sqrt{\beta d}}; \Psi_R(h) = \left[ L\left(\frac{d}{R_q}\right) \cdot \left[ 1 - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right] + \frac{R_q}{d\sqrt{2\pi}} \cdot \left[ \frac{1}{2} - L\left(\frac{d}{R_q}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2R_q^2}\right) - \frac{1}{4} \right]^{-0,5}$		(3)
$A_r = a_r \cdot \Psi_A(h); a_r = \pi N \beta d; \Psi_A(h) = L\left(\frac{d}{R_q}\right) + \frac{R_q}{d \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2 \cdot R_q^2}\right) - \frac{1}{2};$ $\beta = \sqrt{r_{пр} r_{поп}}$		(4)
$A_c = \pi \cdot n_a \cdot n_b \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F_r}{E \cdot \Sigma \rho}\right)^2} - A_d; N = \frac{A_c}{S_{m1} \cdot S_{m2}}; d = R_p - \delta$		(5)
$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\Sigma \rho}; a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2K}{\pi m_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1 - \eta^2}{E}\right)^2} \cdot F_r^2$		(6)
$f(h_1) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \left\{ h_1 \cdot \sqrt{\frac{3(2\alpha - 3)}{\alpha^2}} \cdot \exp(-C_1 \cdot h_1^2) + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} \cdot (h_1^2 - 1) \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2(2\alpha - 3)}}\right) \right] \times \right.$ $\left. \times \exp\left(-\frac{h_1^2}{2}\right) + \sqrt{\frac{2\pi\alpha}{3(\alpha - 1)}} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(h_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha - 1)(2\alpha - 3)}}\right) \right] \cdot \exp\left(-\frac{\alpha h_1^2}{2(\alpha - 1)}\right) \right\}$ $h_1 = \frac{h}{\sqrt{m_0}}; \alpha = \frac{m_0 \cdot m_4}{m_2^2}; C_1 = \frac{\alpha}{2 \cdot \alpha - 3}; \alpha = 1,5 + k \cdot t$		(7)
$R_{пов}(\varphi) = R_{пов0} + \sum_{i=1}^p Q_k \cdot \sin(k \cdot \varphi + \varphi_k)$		(8)
$\begin{cases} D(x) = \frac{D_{max}}{\sqrt{[m_d \cdot (x - x')]^s + 1}} \\ D(x) = \frac{D_{max}}{\sqrt{\varepsilon^2 \cdot T_n^s \cdot m_d \cdot (x - x') + 1}} \end{cases}$		(9)

Рассмотрим условные обозначения, принятые в формулах таблицы 1. Физический смысл переменных  $\rho_{см}$ ,  $r_k$ ,  $h_0$ ,  $\rho_m$  дан в расшифровке переменных формулы (1). Переменные  $r_{пр}$ ,  $r_{поп}$  – это значения радиусов закругления вершин микронеровностей профиля деталей узла трения в продольном и поперечном направлениях. Переменная  $\beta$  – это значение радиуса вершины выступа единичной неровностей, моделируемой сферическим сегментом.

Параметр  $\delta$  моделирует сближение контактирующих поверхностей ( $\delta = h - d$ ); функция  $L(d/R_q)$  представляет собой функцию Лапласа, переменные  $A_d$ ,  $A_a$ ,  $A_c$ ,  $A_r$  моделируют, соответственно, площадь локального дефекта, номинальную площадь контакта, контурную площадь контакта и фактическую площадь контакта поверхностей деталей узла трения. Переменные  $S_{m1}$ ,  $S_{m2}$  характеризуют средние значения шага микронеровностей профиля приведённой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а параметр  $N$  задаёт количество микронеровностей, которые находятся в пределах номинальной площади контакта. Шероховатость двух поверхностей задана приведённым параметром  $R_p = R_{p1} + R_{p2}$ . Номинальное значение зазора между поверхностями задана переменной  $d$ , константы  $E$  и  $\eta$

задают значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, приведённые к обоим контактирующим поверхностям. Нормальная сила нагружения узла трения задана переменной  $F_r$ . Геометрические особенности поверхностей деталей узла трения заданы переменной  $\Sigma\rho$ , определённой как сумма главных кривизн.

Случайная функция распределения высоты микронеровностей задана параметрами, приведёнными к обоим поверхностям:  $h$  и  $h_1$  – высота микронеровностей в абсолютных и относительных единицах;  $\alpha$  – параметр широкополосности профиля;  $m_0, m_2, m_4$  – числовые характеристики спектральной плотности высоты микронеровностей профиля;  $(2K/\pi a)$ ,  $C_1, k$  – совокупность табличных коэффициентов;  $t$  – период эксплуатации узла трения.

Для моделирования макроотклонений деталей узла трения использованы величины:  $R_{\text{пов}}(\rho)$  и  $R_{\text{пов}0}$  – соответственно, функция радиус сечения детали и средний радиус сечения;  $Q_k, \varphi_k$  – амплитудное значение и фазовый угол  $k$ -й составляющей макроотклонения;  $p$  – наибольший номер учитываемой составляющей макроотклонения [10].

Для моделирования локальных дефектов поверхностей деталей узла трения заданы переменные:  $D_{\text{max}}, m_d$  и  $x'$  – соответственно, наибольшая глубина, номинальная протяженность и номинальное смещение локального дефекта;  $s, \varepsilon$  – коэффициенты профиля локального дефекта;  $T_n(x)$  – полином Чебышева  $n$ -й степени для координаты  $x$ .

### Применение модели для оценки электрического сопротивления узла трения

Расчёт числовых характеристик случайной функции сопротивления контакта проводят по блокам формул (2...9), последовательно вычисляя переменные модели:

- геометрические параметры отклонений формы, локальных дефектов, высоту микронеровностей поверхностей деталей узла трения (блоки формул 7...9);
- параметр сближения  $\delta$  поверхностей деталей узла трения (блок формул 6);
- параметры контурной площади контакта  $A_c$ , включая количество неровностей  $N$  в пределах пятна контакта, значение зазора  $d$  между поверхностями (блок формул 5);
- числовые значения функции фактической площади контакта  $A_r$  (блок формул 4);
- приведённый радиус вершины выступа единичной неровностей  $\beta$ , числовые характеристики функции электрического сопротивления  $a_R$  и  $\Psi_R(h)$  (блок формул 3);
- в зависимости от условий смазки узла трения: электрическое сопротивление стягивания  $R_{\text{ст}}$  или электрическое сопротивление смазочной плёнки  $R_{\text{сп}}$  (блок формул 2).

Для перехода от отдельного фрикционного контакта к узлу трения конкретного механизма необходимо представить механизм в виде совокупности фрикционных контактов и построить электрическую схему замещения этого узла. Для этого необходимо:

- выделить отдельные фрикционные контакты в узле и представить каждый из них электрической схемой замещения (в простейшем случае – в виде сопротивления резистора);
- установить характер электрических связей деталей узла и указать эти связи на схеме;
- определить значение сопротивления для каждого фрикционного контакта по выражениям (1) – (9) модели;
- в зависимости от характера соединения этих сопротивлений преобразовать схему замещения и рассчитать сопротивление узла в целом.

В качестве примера рассмотрим реализацию подходы при формировании модели подшипника качения, который имеет кольцо внутреннее (КВ), кольцо наружное (КН),  $Z$  тел качения (ТК<sub>*i*</sub>), установленных в сепараторе (СП). При диагностировании электрическое сопротивление измеряется между внутренним и наружным кольцами.

На первом этапе выделяем отдельные фрикционные контакты. Это контакты каждого  $i$ -ого тела качения с внутренним кольцом (ФК<sub>В<sub>*i*</sub></sub>); контакты каждого  $i$ -ого тела качения с наружным кольцом (ФК<sub>Н<sub>*i*</sub></sub>); контакты каждого  $i$ -ого тела качения с сепаратором (ФК<sub>С<sub>*i*</sub></sub>).

Анализируя характер электрических связей между деталями подшипника, формируем структурную схему замещения подшипника (рисунок 1а), а представляя каждый фрикционный контакт в виде электрического сопротивления, получаем эквивалентную электрическую схему замещения подшипника качения (рисунок 1б). С учетом соединения

сопротивлений в эквивалентной схеме замещения упрощаем ее (рисунок 1в) и рассчитываем сопротивление подшипника  $R_{\Pi}$  в целом.

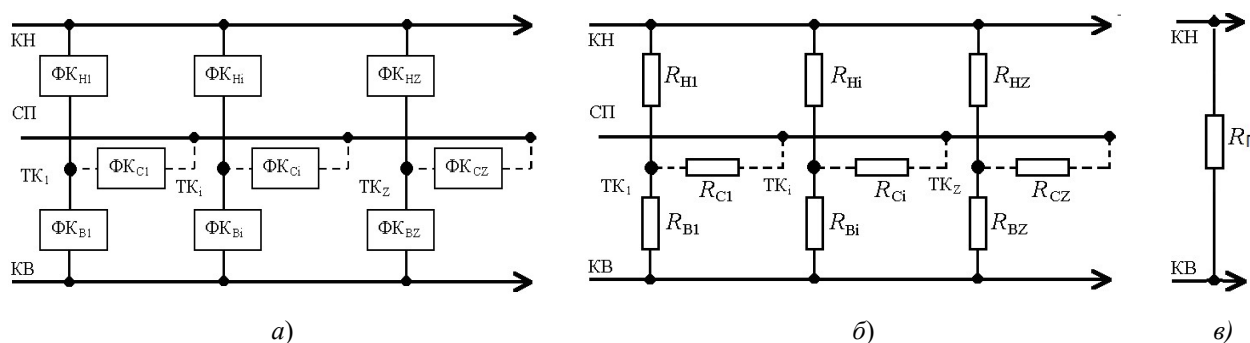


Рисунок 1 – Структурная (а), эквивалентная электрическая (б) и упрощенная (в) схемы замещения подшипника качения

Для примера применения такого подхода ниже представлены результаты теоретического исследования с использованием данной модели подшипника качения типа 306 ГОСТ 8338-75. На рисунке 2 представлены теоретические зависимости среднего значения электрического сопротивления подшипника от характеристик шероховатости рабочих поверхностей различных деталей.

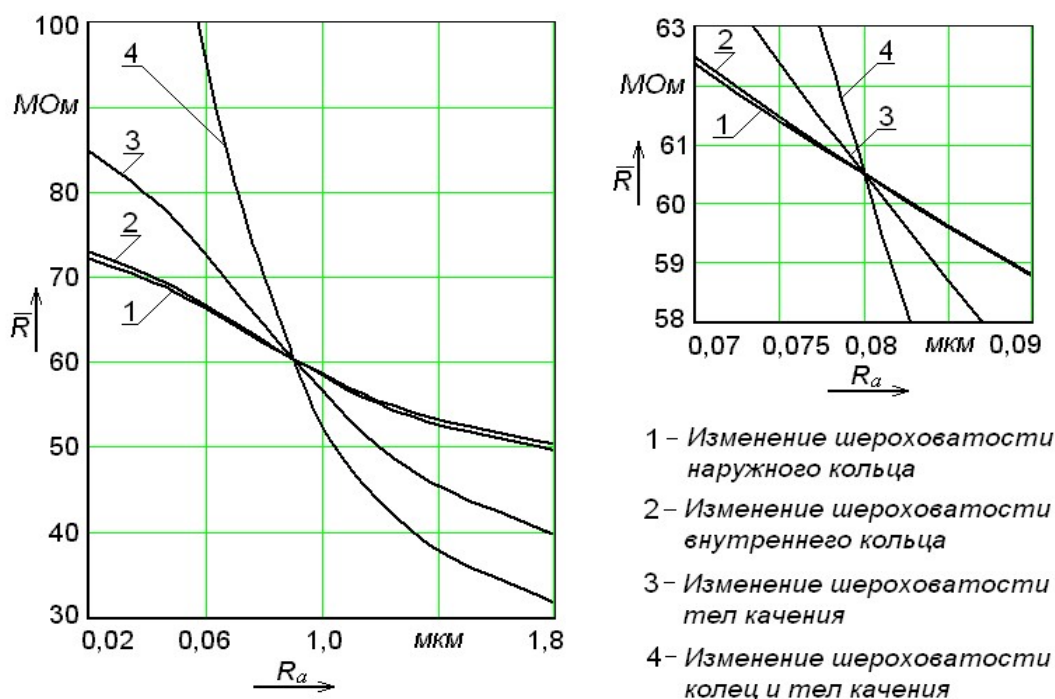


Рисунок 2 – Графики расчетных зависимостей среднего значения электрического сопротивления подшипника 306 от шероховатости поверхностей для режима смешанной смазки

Из графиков видно, в частности, что модель позволяет оценить влияние качества рабочих поверхностей деталей подшипника качения на среднее значение его сопротивления.

В качестве другого примера реализации предложенного подхода рассмотрим моделирование одноступенчатого зубчатого редуктора, кинематическая схема которого представлена на рисунке 3, а. Редуктор имеет вал I и вал II, каждый из которых установлен в корпусе с помощью опор, соответственно,  $O_{11}, O_{12}$  и  $O_{21}, O_{22}$ . На валах закреплены зубчатые колеса  $Z_1$  и  $Z_2$ .

На первом этапе выделяем отдельные фрикционные контакты. Это фрикционные контакты каждой из опор первого вала  $\Phi K_{O11}, \Phi K_{O12}$ , фрикционные контакты каждой из опор

второго вала  $\Phi K_{O21}$   $\Phi K_{O22}$  и фрикционный контакт зубчатой пары  $\Phi K_{3П}$ . Анализируя характер электрических связей между деталями редуктора, формируем его схему замещения (рисунок 3, б), а представляя каждый фрикционный контакт в виде сопротивления, получаем эквивалентную электрическую схему замещения редуктора (рисунок 3, в).

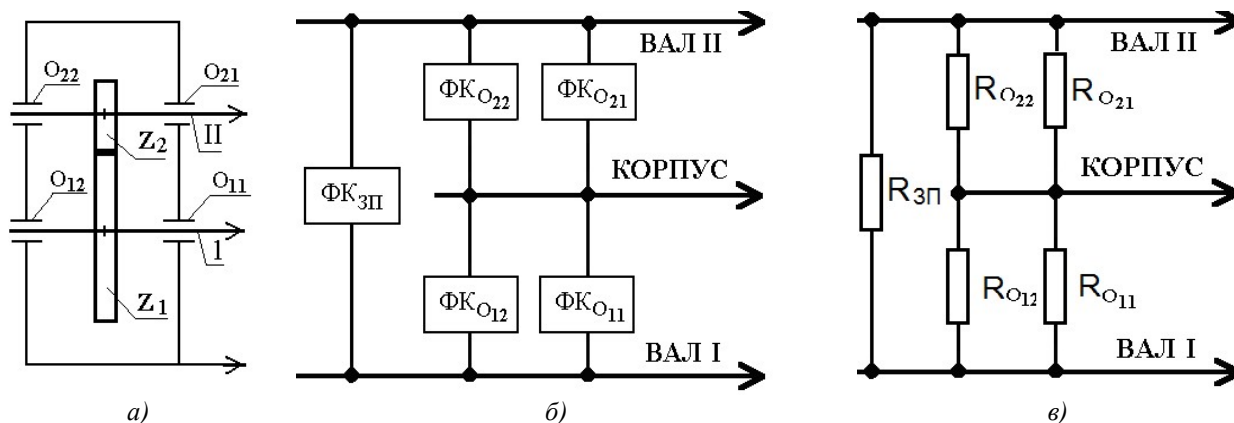


Рисунок 3 – Кинематическая (а), структурная (б) и эквивалентные электрические схемы замещения (в) редуктора

$I, II$  – валы;  $O_{11}, O_{12}, O_{21}, O_{22}$  – опоры валов;  $Z_1, Z_2$  – зубчатые колеса;  $\Phi K_{3П}, \Phi K_{O11}, \Phi K_{O12}, \Phi K_{O21}, \Phi K_{O22}$  – фрикционные контакты зубчатой пары и соответствующих опор;  $R_{3П}, R_{O11}, R_{O12}, R_{O21}, R_{O22}$  – сопротивления фрикционных контактов зубчатой пары и соответствующих опор

Дальнейшее преобразование эквивалентной электрической схемы замещения может быть различным в зависимости от того, между какими деталями будет определяться сопротивление при диагностировании. Возможные примеры таких преобразований представлены на рисунке 4.

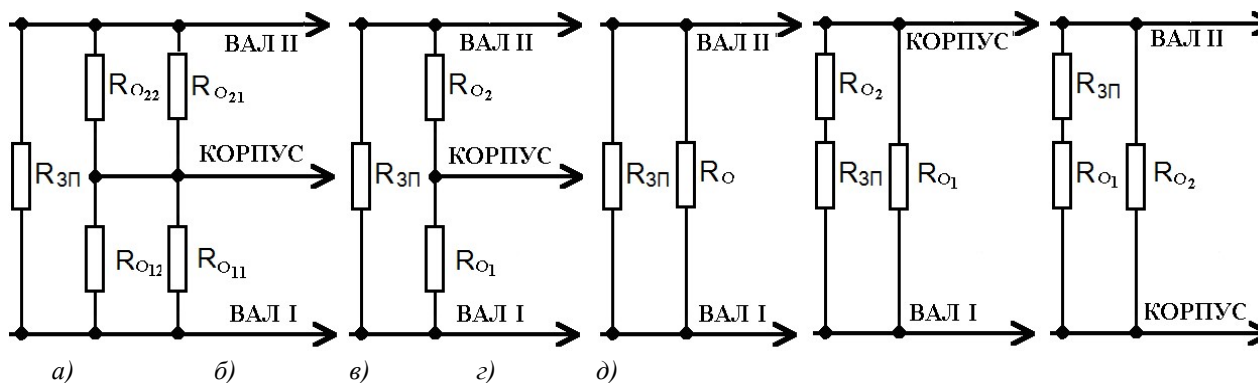


Рисунок 4 - Эквивалентная электрическая схема замещения (а) редуктора и ее преобразования (б-д) при различных подключениях измерительной аппаратуры

Исходная схема замещения (а) редуктора включает по два параллельно соединенных сопротивления опор каждого вала, поэтому она преобразуется в схему (б), где:

$$R_{O1} = R_{O11} \cdot R_{O12} / (R_{O11} + R_{O12}); R_{O2} = R_{O21} \cdot R_{O22} / (R_{O21} + R_{O22}).$$

Далее в зависимости от того, к каким деталям будет подключена аппаратура, анализирующая при диагностировании электрическое сопротивление редуктора, возможны различные варианты преобразования эквивалентной схемы.

Так, например, при измерении сопротивления между двумя валами схема будет иметь вид (в). При этом  $R_o = R_{O1} + R_{O2}$ , а общее сопротивление редуктора  $R_{РВВ}$  будет равно:

$$R_{РВВ} = R_{3П} \cdot R_o / (R_{3П} + R_o).$$

При измерении сопротивления между корпусом и валом 1 схема имеет вид (г), а общее сопротивление редуктора  $R_{РКВ1}$  определяется выражением:

$$R_{РКВ1} = (R_{3П} + R_{O2}) \cdot R_{O1} / (R_{3П} + R_{O2} + R_{O1}).$$

В случае же измерения сопротивления между корпусом и валом II схема будет иметь вид (д), а общее сопротивление редуктора  $R_{pKB2}$  будет равно:

$$R_{pKB2} = (R_{3П} + R_{01}) \cdot R_{02} / (R_{3П} + R_{02} + R_{01}).$$

Таким образом, анализ полученной модели при подключениях измерительной аппаратуры к различным деталям может позволить в дальнейшем синтезировать метод разделения информации о состоянии опор качения и зубчатого зацепления путем соответствующей обработки результатов измерения сопротивления при этих подключениях.

### Заключение

Представленный в данной работе подход к математическому моделированию электрического сопротивления узла трения в виде совокупности отдельных фрикционных контактов может позволить применить известную и глубоко проработанную теорию электрорезистивного диагностирования опор качения к проблемам оценки технического состояния самых разнообразных машин и приборов, содержащих узлы трения. При этом получаемая модель учитывает конструктивные параметры отдельных деталей объекта (номинальные размерные параметры деталей, свойства материалов, шероховатость, отклонения от правильной геометрической формы и расположения рабочих поверхностей, параметры локальных дефектов), свойства смазочных материалов и режимы эксплуатации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. Под общей ред. В.В. Клюева. – 2-е издание, исправленное. – Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / В.П. Вавилов. Кн.2: Электрический контроль. / К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с.
2. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
3. Подмастерьев, К.В. Электрорезистивный метод мониторинга технического состояния, качества, надёжности и безопасности опор качения электрических машин / В.В. Марков, В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, А.В. Селихов, Н.В. Углова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2024. - № 1(363). - С.149-157.
4. Podmasreryev, K.V. Electroresistive method for monitoring the technical condition, quality, reliability and safety the supports of rolling of electrical machines / K.V. Podmasreryev, V.V. Markov, V.V. Mishin, A.V. Selikhov, N.V. Uglova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Т. 1211. № 1. P. 12-21.
5. Мышкин, Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
6. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 256 с.
7. Демкин, Н.Б. Теория контакта реальных поверхностей, и трибология / Н.Б. Демкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
8. Мышкин, Н.К. Контакт шероховатых тел и его проводимость / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. / Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 1983. – Т. 4. – № 5. – С. 845-853.
9. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин / Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966. – 194 с.
10. Мишин, В.В. Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения: Дисс. канд. техн. наук / В.В. Мишин. – Орел: 2000. – 265 с.
11. Пахолкин, Е.В. Моделирование и теоретическое исследование влияния локальных дефектов рабочих поверхностей трибосопряжения на состояние смазочного слоя в зоне трения / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – № 3. – С 71-74.

**Подмастерьев Константин Валентинович**

Ф

Доктор технических наук, профессор,

директор института приборостроения, автоматизации и информационных технологий

302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29

E-mail: asms-orel@mail.ru

**Марков Владимир Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,

кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой приборостроения, метрологии и сертификации

302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95.

E-mail: pms35vm@yandex.ru

PODMASRERYEV K.V., MARKOV V.V.

## CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE MECHANISM USING A MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRICAL RESISTANCE OF A FRICTION UNIT IN THE FORM OF A SET OF FRICTIONAL CONTACTS

**Abstract.** *The results of the mathematical resistance of the friction unit are presented, which is based on the idea of the friction unit as a set of friction contacts. In this case, the geometric shape of the friction contacts is specified depending on the typical contact patterns of the surfaces of the friction unit parts. The mathematical model of the electrical resistance of the friction contact is based on the idea of the possibility of modeling the height of microroughnesses of the working surfaces of the friction unit parts through the theory of a random field. The proposed approach to modeling the electrical resistance of the friction unit expands the known theory of diagnosing rolling bearings by electroparametric methods in the field of application for other types of machine parts.*

**Keywords:** *friction; friction unit; frictional contact; diagnostics; electrical resistance; electroparametric method; random field theory; rolling support*

### BIBLIOGRAPHY

1 Non-destructive testing: Handbook: in 8 volumes. Under the general editorship of V. V. Klyuev. – 2nd edition, corrected. - V. 5: In 2 books. Book 1: Thermal testing / V. P. Vavilov. Book 2: Electrical testing. / K. V. Podmasterev, F. R. Sosnin, S. F. Korndorf, T. I. Nogacheva, E. V. Pakholkin, L. A. Bondareva, V. F. Muzhitsky. – Moscow: Mashinostroenie, 2006. – 679 p.

2. Podmasterev, K. V. Electroparametric methods of complex diagnostics of rolling bearings / K. V. Podmasterev. – Moscow: Mashinostroenie-1, 2001. – 376 p.

3. Podmasterev, K. V. Electroresistive method for monitoring the technical condition, quality, reliability and safety of the supports of rolling of electrical machines / V.V. Markov, V.V. Mishin, K.V. Podmasterev, A.V. Selikhov, N.V. Uglova // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2024. - No. 1 (363). - P.149-157. Doi: DOI: 10.33979/2073-7408-2024-363-1-149-157.

4. Podmasreryev, K.V. Electroresistive method for monitoring the technical condition, quality, reliability and safety the supports of rolling of electrical machines / K.V. Podmasreryev, V.V. Markov, V.V. Mishin, A.V. Selikhov, N.V. Uglova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1211. No. 1. P. 12-21.

5. Myshkin, N.K. Tribology. Principles and Applications / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. - Gomel: IMMS NASB, 2002. - 310 p.

6. Konchits, V.V. Tribology of Electrical Contacts / V.V. Konchits, V.V. Meshkov, N.K. Myshkin. - Minsk: Science and Technology, 1986. - 256 p.

7. Demkin, N.B. Theory of Contact of Real Surfaces, and Tribology / N.B. Demkin // Friction and Wear. - 1995. - Vol. 16. - No. 6. - P. 1003-1024.

8. Myshkin, N.K. Contact of rough bodies and its conductivity / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. / N.K. Myshkin // Friction and wear. - 1983. - Vol. 4. - No. 5. - Pp. 845-853.

9. Ryzhov, E.V. Contact rigidity of machine parts / E.V. Ryzhov. - Moscow: Mechanical Engineering, 1966. - 194 p.

10. Mishin, V.V. Method and means of diagnosing bearing assemblies taking into account the macrogeometry of rolling raceways: Diss. Cand. of Engineering Sciences / V.V. Mishin. - Orel: 2000. - 265 p.

11. Pakholkin, E.V. Modeling and theoretical study of the influence of local defects of the working surfaces of the tribocoupling on the state of the lubricant layer in the friction zone / E.V. Pakholkin, K.V. Podmasterev // News of OrelSTU. - Series: Mechanical Engineering. Instrument Making. - Orel: OrelSTU, 2003. - No. 3. - P. 71-74.

#### **Podmasteryev Konstantin Valentinovich**

Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Education «Orel State University named  
after I.S. Turgenev»,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, director of the  
Institute of Instrument Engineering, Automation and  
Information Technologies  
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29  
E-mail: asms-orel@mail.ru

#### **Markov Vladimir Vladimirovich**

Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Education «Orel State University named  
after I.S. Turgenev»,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Acting Head of the Department of Instrument  
Engineering, Metrology and Certification,  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
E-mail: pms35vm@yandex.ru

ЩЕМЕЛЕВА Ю.Б.

## КАЧЕСТВО ДАННЫХ КАК ФАКТОР УСПЕШНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

**Аннотация.** Бурное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) оказывает значительное влияние на все сферы жизни человека и развитие общества. Самая передовая энергоснабжающая отрасль экономики – электроэнергетика – с учетом глобальных изменений в потреблении электроэнергии, становится площадкой для повсеместного внедрения ИИ для повышения эффективности процессов. В данной работе рассматриваются основные тенденции в этой области, а также практическое использование ИИ в энергетике, включая примеры его внедрения в производство, распределение, а также в прогнозировании потребления энергии. В работе рассматриваются основные вызовы сегодняшнего дня в сфере применения ИИ: качество данных, а также необходимость защиты данных и сетевой инфраструктуры от киберугроз. Целью работы является анализ проблемы качества данных в электроэнергетике.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект (ИИ), электроэнергетика, оптимизация процессов, прогнозирование потребления, умные сети, энергетическая эффективность, машинное обучение, big data в энергетике, цифровая трансформация, аналитика данных, интеллектуальные решения.

### Введение

Феномен искусственного интеллекта, его практического применения, этики использования, степени доверия рассматривается сегодня в практически любом научном сообществе применительно к различным областям знаний. В отрасли электроэнергетики это вопрос также не остается без внимания. Разные исследователи рассматривают и историческую ретроспективу с обзором терминологии [1], и «научную систематизацию теоретических основ использования нейросетей и систем искусственного интеллекта для ускоренной цифровой трансформации предприятий электроэнергетики» [2], и практические локальные аспекты внедрения ИИ в работу энергосетевых компаний. [3, 4, 5, 6, 7]

Как результат научных исследований и внедрения передовых разработок, уже сегодня можно наблюдать повсеместное использование систем искусственного интеллекта в работе энергосетевых компаний. Так для управления тепловыми электростанциями используются алгоритмы машинного обучения, что позволяет оптимизировать процессы сжигания топлива, минимизируя выбросы и увеличивая общую эффективность. Например, компания General Electric внедрила ИИ-систему, которая анализирует данные о работе ТЭС и предлагает оптимальные режимы работы для повышения производительности. «General Electric применяет оснащенную ИИ платформу Predix, чтобы следить за работой оборудования... Predix собирает и анализирует огромный объем данных». [8] ИИ-технологии используются для улучшения управления распределительными сетями за счет автоматического выявления и устранения аварийных ситуаций. Например, система IBM Weather Company использует ИИ для анализа погодных данных и предсказания потребности в энергии в зависимости от погодных условий, что позволяет энергокомпаниям лучше планировать распределение ресурсов. «Сложные алгоритмы ИИ от The Weather Company... (дают) рекомендации, которые могут подсказать электроэнергетической компании, где обрезать деревья, чтобы предотвратить отключения электроэнергии до следующего шторма». [9] Системы ИИ применяются и для прогнозирования выработки энергии на солнечных панелях, и для прогнозирования скорости и направления ветра для работы ветряков. Использование ИИ для анализа больших данных позволяет энергокомпаниям улучшать точность прогнозов потребления. Например, калифорнийская компания Pacific Gas and Electric применяет ИИ для анализа исторических данных о потреблении энергии, что позволяет предсказывать пиковые нагрузки, а также для найма сотрудников и борьбы с лесными пожарами.

### Анализ текущей ситуации

Если рассматривать текущие тенденции в электроэнергетике, то следует отметить повсеместное внедрение умных счетчиков в системе АСКУЭ, что позволяет собирать в

реальном времени данные о потреблении и производстве энергии, дистанционно управлять процессом распределения и потребления, а также обеспечивать точный анализ и прогнозирование электропотребления, которое в РФ ежегодно растет, что подтверждается данными Аналитического центра ТЭК <https://actek.group/> [10], представленными на рисунке 1.



Источник: Росстат, анализ рабочей группы

Рисунок 1 – Динамика электропотребления по регионам РФ за 2021г., млрд кВт\*ч [10]

Рассуждая о вызовах сегодняшнего дня, надо помнить, что для эффективного использования ИИ требуется обилие качественных данных. Именно этот вопрос сейчас становится актуальным. Кроме того, с развитием цифровой экономики в целом, цифровизации электроэнергетики в частности и внедрением ИИ, возрастает необходимость защиты данных и сетевой инфраструктуры от киберугроз.

Целью данной работы является анализ проблемы качества данных в электроэнергетике. Качество данных является критическим фактором для успешного применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в энергетическом секторе. Низкое качество данных может привести к неправильным прогнозам, неэффективным решениям и увеличению затрат. Поэтому возникает задача разработки алгоритмов и стратегий, направленных на улучшение качества данных.

### Постановка проблемы качества данных

Одной из значимых проблем, влияющих на качество данных является недостаток данных. Эта проблема обусловлена тем, что на территории РФ действует, помимо крупных, достаточно большое количество средних и мелких энергоснабжающих компаний, каждая из которых ведет свой сбор, учет, анализ данных, однако в целом по стране эти базы данных не интегрируются между собой. Еще одной проблемой являются помехи в данных. К ним относятся и ошибки в данных, вызванные человеческим фактором, и сбой данных из-за технических неисправностей оборудования, что в целом приводит к искажению информации. Следует также учитывать неоднородность данных. Она возникает ввиду того, что имеют место быть различные форматы представления данных, такие как числовые ряды, текстовые записи, временные ряды, табличные фрагменты. Это многообразие затрудняет их совместное использование и анализ. Еще одна проблема - устаревание данных – закономерный процесс,

при котором информация, которая была актуальна ранее, может стать менее полезной со временем.

### Разработка алгоритма оценки качества данных

Для повышения качества данных предлагается использовать следующий алгоритм реализации, представленный в виде блок-схемы на рисунке 2.

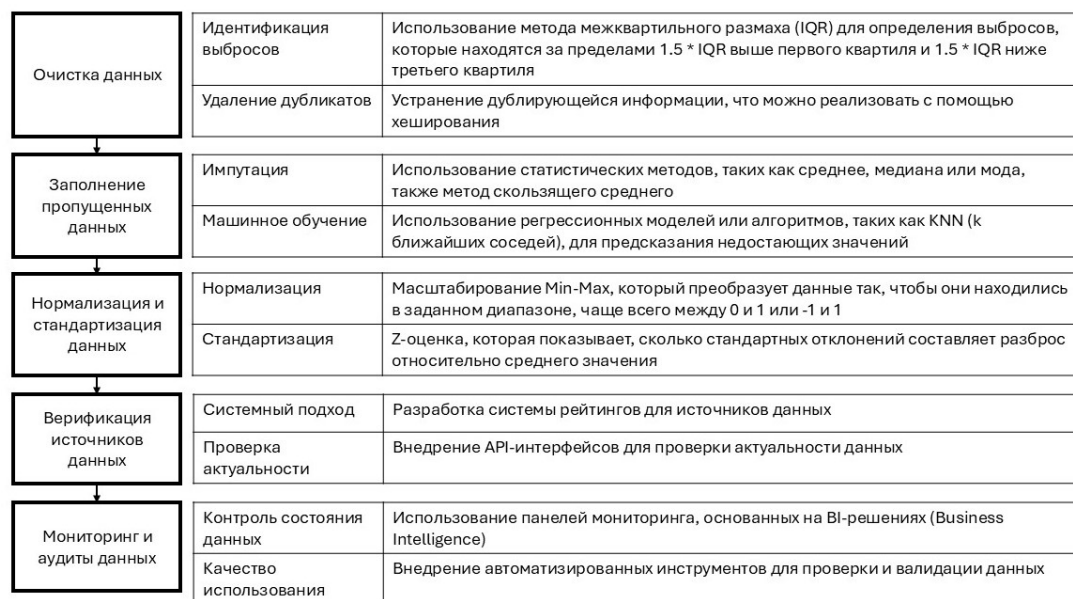


Рисунок 2 – Алгоритм повышения качества данных

Для подтверждения эффективности алгоритмов повышения качества данных можно использовать такие метрики оценки качества данных, как точность данных (процент правильной информации по сравнению с общим объемом), полнота данных (отношение количества ненулевых значений к общему количеству значений), целостность данных (оценка отсутствия несоответствий в данных). Эти метрики возможно вычислять заранее и после очистки данных, что даст количественную оценку улучшений.

Качество данных является определяющим фактором для успешного применения ИИ в энергетике. Реализация алгоритмов очистки, нормализации, заполнения пропусков и мониторинга данных может значительно повысить надежность и точность моделей ИИ. Эти действия, основанные на математических принципах и статистических методах, способны минимизировать ошибки и повысить эффективность энергетических систем.

Одним из примеров использования больших данных в энергетике можно считать проект "Smart Grid" (умные сети), реализуемый для оптимизации распределения электрической энергии. «На территории России SMART GRID получила название Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС)». [11] Умные электросети интегрируют информационные и коммуникационные технологии в традиционные электрические сети для улучшения управления энергопотоками, повышения надежности и эффективности распределения электроэнергии. Это достигается за счет сбора и анализа больших объемов данных в реальном времени от различных источников. Анализ больших данных с использованием искусственного интеллекта (ИИ) возможен на основе языка программирования Python с применением его обширных библиотек. Алгоритм анализа включает в себя несколько ключевых этапов, описанных нами в таблице 1.

### Перспективы использования

Искусственный интеллект (ИИ) в энергетическом секторе может быть применен для различных выборок данных, каждая из которых имеет свои особенности и требования. Ниже приведены основные типы выборок данных, для которых можно использовать алгоритмы ИИ:

Таблица 1 – Алгоритм анализа на языке Python

Этап	Описание реализации
Импорт необходимых библиотек	Необходимо установить и импортировать библиотеки, которые будут использоваться для анализа данных.
Сбор и загрузка данных	Данные могут быть собраны из различных источников, таких как базы данных, CSV-файлы или API
Предварительная обработка данных	Перед тем как приступить к анализу, важно провести очистку и подготовку данных: заполнение пропусков средними значениями, удаление ненужных столбцов, нормализация, создание объектов классов для нормализации данных
Разделение данных	Необходимо разделить данные на обучающую и тестовую выборки
Обучение модели	Обучить модель машинного обучения на обучающей выборке (например, с помощью алгоритма случайного леса Random Forest).
Оценка производительности модели	Оценить модель на тестовой выборке, чтобы понять, насколько точно она делает предсказания, а именно: провести прогноз на тестовых данных, оценить производительность, определить среднеквадратичную ошибку, использовать метрики оценки качества модели регрессии
Визуализация	Визуализация фактических и предсказанных значений основывается на построении диаграммы рассеяния, где по оси X расположены фактические значения, а по оси Y – предсказанные значения

1) к данным о потреблении энергии относятся данные об историческом потреблении энергии в разных временных промежутках (час, день, месяц). Эти данные могут быть собраны с помощью умных счетчиков или систем управления;

2) данные о производительности оборудования представляют собой показатели работы генераторов, турбин, трансформаторов и других компонентов электросетей. Для анализа этих данных могут быть использованы алгоритмы предсказательной аналитики для выявления аномалий и прогнозирования возможных отказов оборудования;

3) данные о рынке и экономике включают в себя информацию о ценах на энергию, спросе на рынке и других экономических индикаторах. Эти данные могут помочь в оптимизации распределения ресурсов и ценообразовании;

4) социально-экономические данные содержат информацию о населении, уровне доходов, потреблении энергии в различных секторах (например, жилые дома, промышленность). Алгоритмы кластеризации могут быть использованы для сегментации потребителей и разработки индивидуальных предложений на основе их потребностей.

Каждый из указанных типов выборок имеет свои уникальные характеристики и требования для обработки и анализа. Применение искусственного интеллекта для этих выборок может значительно повысить эффективность, надежность и устойчивость эксплуатации энергетических систем. Выбор алгоритма зависит от цели анализа и специфики собранных данных.

### Заключение

Подводя итог, следует отметить, что будущее ИИ в секторе электроэнергетики выглядит многообещающим. Ожидается, что технологии ИИ будут продолжать развиваться, обеспечивая более эффективное управление ресурсами, улучшая интеграцию возобновляемых источников энергии и способствуя устойчивым практикам. Кроме того, потенциальные инвестиции в исследования и инновации могут привести к созданию новых решений, направленных на преодоление текущих вызовов.

Искусственный интеллект становится неотъемлемой частью современного энергетического сектора, предлагая множество возможностей для оптимизации процессов и повышения эффективности. В то же время, успешное внедрение ИИ связано с определёнными вызовами, которые требуют внимания и решения. Тем не менее, при должном подходе и инвестициях в технологии, ИИ имеет потенциал трансформировать энергетику, способствуя устойчивому развитию и обеспечивая энергетическую безопасность на глобальном уровне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массель, Л.В. Современный этап развития искусственного интеллекта (ИИ) и применение методов и систем ИИ в энергетике / Л.В. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. №4 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyy-etap-razvitiya-iskusstvennogo-intellekta-ii-i-primeneniye-metodov-i-sistem-ii-v-energetike> (дата обращения: 24.10.2024).
2. Унижаев, Н.В. Особенности внедрения нейросетей и систем искусственного интеллекта на предприятиях электроэнергетики / Н.В. Унижаев // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Том 13. – № 1. – С. 215-232. – doi: 10.18334/vnec.13.1.116945.
3. Тришкин, И. А. Цифровизация в энергетике: практическая реализация / И. А. Тришкин, Ю. Б. Щемелева // Проблемы автоматизации. Региональное управление. связь и акустика : Сборник трудов XII Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума, Геленджик, 01–03 ноября 2023 года. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2023. – С. 257-261. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59292623>
4. Астафьева, Д. В. Искусственный интеллект в прикладных вопросах энергетики / Д. В. Астафьева // Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России : сборник трудов XIV Всероссийской Школы-семинара, молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников, Геленджик, 26–28 апреля 2023 года. – Геленджик: Южный федеральный университет, 2023. – С. 385-390. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54488562>
5. Поляковский Д.В. Практические задачи энергоснабжающей организации: передовые решения / Поляковский Д.В., Щемелева Ю.Б. // В сборнике: Современные электротехнические и информационные комплексы и системы. Материалы V Международной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и научно-технических работников, посвященной 105-летию со дня образования КубГТУ. 2023. С. 50-54. - <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60576831>
6. Астафьева, Д. В. Мониторинг состояния ЛЭП: инновационные решения / Д. В. Астафьева, Ю. Б. Щемелева // Сборник трудов международной молодёжной школы «Инженерия - XXI» : Сборник трудов Второй международной научно-практической конференции и международной молодёжной школы, Новороссийск, 21–22 апреля 2022 года. – Новороссийск: Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» в г. Новороссийске, 2022. – С. 176. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50259949>
7. Щемелева, Ю. Б. Развитие АСКУЭ на базе интеллектуальных приборов учета / Ю. Б. Щемелева // Современные электротехнические и информационные комплексы и системы: Материалы IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и преподавателей, Армавир, 10–12 ноября 2022 года. – Армавир: ООО «Редакция газеты «Армавирский собеседник», 2022. – С. 80-83. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50093055>
8. Из машины: как искусственный интеллект продлевает работу оборудования. РБК. (электронный ресурс) <https://pro.rbc.ru/demo/5d67ada89a7947c004a72389> (дата обращения 24.10.2024)
9. IBM GRAF использует возможности искусственного интеллекта и облака компании The Weather Company. (электронный ресурс) <https://www.forbes.com/sites/ibm/2019/12/11/ibm-graf-builds-on-the-weather-companys-ai-and-cloud-capabilities/> (дата обращения 24.10.2024)
10. Аналитический центр ТЭК (электронный ресурс) [https://actek.group/russian\\_electric\\_power\\_industry/](https://actek.group/russian_electric_power_industry/) (дата обращения 24.10.2024)
11. Smart Grid или умные сети электроснабжения. (электронный ресурс) <https://eneca.by/novosti/energetika-i-energoeffektivnost/smart-grid-ili-umnye-seti-elektrosnabzheniya> (дата обращения 24.10.2024)

### Щемелева Юлия Борисовна

Южный федеральный университет, Филиал ЮФУ в г. Геленджике

Кандидат технических наук, доцент кафедры ЕиГН

Профессор РАЕ

353460, г. Геленджик, ул. Заставная, 10а

Тел. 8-903-455-07-05

e-mail: da-yula@yandex.ru

SHCHEMELEVA Y.B.

## DATA QUALITY AS A FACTOR FOR THE SUCCESSFUL IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE ENERGY SECTOR

**Abstract.** *The rapid development of artificial intelligence (AI) technologies significantly impacts all aspects of human life and societal development. The most advanced energy supply sector of the economy – the electricity industry – is becoming a platform for the widespread implementation of AI to enhance efficiency and optimize processes,*

*considering global changes in electricity consumption. This paper discusses the main trends in this area and the practical application of AI in the energy sector, including examples of its implementation in generation, distribution, as well as in energy consumption forecasting. The paper addresses the key challenges of today in the application of AI: data quality and the need to protect data and network infrastructure from cyber threats. The objective of the study is to analyze the issue of data quality in the electricity sector.*

**Keywords:** artificial intelligence (AI), electricity industry, process optimization, consumption forecasting, smart grids, energy efficiency, machine learning, big data in energy, digital transformation, data analytics, intelligent solutions.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Massel, L.V. Modern stage of development of artificial intelligence (AI) and application of AI methods and systems in energy / L.V. Massel // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2021. No. 4 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyy-etap-razvitiya-iskusstvennogo-intellekta-ii-i-primenenie-metodov-i-sistem-ii-v-energetike> (date accessed: 24.10.2024).
2. Unizhayev, N.V. Features of the Implementation of Neural Networks and Artificial Intelligence Systems in Enterprises of the Electricity Sector / N.V. Unizhayev // Issues of Innovative Economy. – 2023. – Vol. 13. – No. 1. – P. 215-232. – doi: 10.18334/vinec.13.1.116945.
3. Trishkin, I. A. Digitalization in Energy: Practical Implementation / I. A. Trishkin, Y. B. Shchemeleva // Problems of Automation. Regional Management. Communication and Acoustics: Proceedings of the XII All-Russian Scientific Conference and Youth Scientific Forum, Gelendzhik, November 1–3, 2023. – Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2023. – P. 257-261. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59292623>
4. Astafyeva, D.V. Artificial Intelligence in Applied Issues of Energy / D.V. Astafyeva // Research and Creative Projects for the Development and Mastery of Problematic and Coastal-Shelf Zones of Southern Russia: Collection of Proceedings of the XIV All-Russian School-Seminar for Young Scientists, Postgraduates, Students, and Schoolchildren, Gelendzhik, April 26–28, 2023. – Gelendzhik: Southern Federal University, 2023. – P. 385-390. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54488562>
5. Polyakovsky D.V. Practical Tasks of Energy Supply Organizations: Advanced Solutions / Polyakovsky D.V., Shchemeleva Y.B. // In the collection: Modern Electrical and Information Complexes and Systems. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Teachers, Postgraduates, and Researchers, Dedicated to the 105th Anniversary of the Kuban State Technological University. 2023. P. 50-54. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60576831>
6. Astafyeva, D.V. Monitoring the Condition of Power Lines: Innovative Solutions / D.V. Astafyeva, Y.B. Shchemeleva // Proceedings of the International Youth School “Engineering - XXI”: Collection of Papers from the Second International Scientific and Practical Conference and International Youth School, Novorossiysk, April 21-22, 2022. – Novorossiysk: Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” in Novorossiysk, 2022. – P. 176. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50259949>
7. Shchemeleva, Y.B. Development of the Automated Control System for Commercial Electric Energy Based on Intelligent Metering Devices / Y.B. Shchemeleva // Modern Electrical and Information Complexes and Systems: Materials of the IV International Scientific and Practical Conference for Students, Postgraduates, and Instructors, Armavir, November 10–12, 2022. – Armavir: LLC "Redaction of the Newspaper Armavirsky Sobesednik", 2022. – P. 80-83. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50093055>
8. From Machine: How Artificial Intelligence Extends Equipment Lifespan. RBC. (electronic resource) <https://pro.rbc.ru/demo/5d67ada89a7947c004a72389> (date accessed 24.10.2024)
9. IBM GRAF utilizes the capabilities of artificial intelligence and the cloud from The Weather Company. (electronic resource) <https://www.forbes.com/sites/ibm/2019/12/11/ibm-graf-builds-on-the-weather-companys-ai-and-cloud-capabilities/> (date accessed 24.10.2024)
10. Analytical Center for the Fuel and Energy Complex (electronic resource) [https://actek.group/russian\\_electric\\_power\\_industry/](https://actek.group/russian_electric_power_industry/) (date accessed 24.10.2024)
11. Smart Grid or Smart Electricity Supply Networks. (electronic resource) <https://eneca.by/novosti/energetika-i-energoeffektivnost/smart-grid-ili-umnye-seti-elektrosnabzheniya> (date accessed 24.10.2024)

### **Shchemeleva Yuliya Borisovna**

Ph.D. in Technical Sciences

Associate Professor at the branch of the Southern Federal University in Gelendzhik

Professor of the Russian Academy of Natural Sciences

353460, Gelendzhik, Zastavnaya Street, 10a

Phone: +7-903-455-07-05

e-mail: da-yula@yandex.ru

© Щемелева Ю.Б., 2025

МАЛЫЙ Д.О., МАТЮХИН С.И.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ IGBT МОДУЛЕЙ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

**Аннотация.** В статье рассмотрены современные подходы к конструированию силовых полупроводниковых модулей. На примере приборов с основанием 140мм и модулей MIXM и MIXV АО «Протон-Электротекс» показано, как конструкция модулей развивалась по пути снижения индуктивности силовых цепей и оптимизации компоновки внешних соединений. В статье рассмотрены дальнейшие возможные пути развития конструкции IGBT модулей, включающие в себя кардинальную модернизацию структуры теплоотвода, а также использование кристаллов с возможностью контроля температуры и мгновенных значений тока в реальном времени.

**Ключевые слова:** IGBT модули, силовые полупроводниковые модули, тяговый электропривод, преобразователи электроэнергии, индуктивность силовых цепей, параллельное включение IGBT модулей, теплоотвод в силовых полупроводниковых приборах, тепловая модель силового модуля, контроль температуры полупроводникового кристалла, контроль мгновенного значения тока полупроводникового кристалла.

### Введение

IGBT модули высокой мощности промышленного и транспортного исполнения в корпусах с шириной основания 140мм были разработаны и представлены на рынок в начале 1990х годов. Заложенные в них конструктивные и технологические решения в полной мере соответствовали развитию отрасли на тот момент. Данные модули были представлены рядом ведущих производителей и завоевали заслуженную популярность, став стандартом де-факто для построения преобразователей и приводов электродвигателей высокой мощности на последующие десятилетия.

На данный момент накоплен более чем 30-ти летний опыт применения приборов данного типа, сменилось несколько поколений IGBT кристаллов, повысились рабочие частоты, стали доступны новые технологии корпусирования, эволюционировали подходы к построению преобразователей. Несмотря на то, что дизайн 140мм модулей претерпел несколько обновлений за время своего существования, концептуальные и принципиальные ограничения самого форм-фактора всё чаще становятся лимитирующим фактором для дальнейшей оптимизации конструкции преобразователей. Указанные предпосылки легли в основу проектирования новых поколений IGBT модулей, одними из которых стали приборы типа MIXM и MIXV АО «Протон-Электротекс».

### Модули в корпусах с основанием 140мм

Модули в корпусах с основанием 140мм (

Рисунок 1) выпускаются в исполнениях под средние (до 3300В, M1NM) и высокие (свыше 3300В, M1NV) напряжения. Схемотехнически модуль представляет собой одиночный IGBT ключ с обратным диодом, конструктивно состоящий из нескольких параллельно включенных субмодулей с общей цепью управления (

Рисунок 2). Приборы выполнены с применением AlN подложек для обеспечения требуемой изоляции и теплоотвода, а также AlSiC оснований для обеспечения лучшей циклоустойкости.

Специфика применения такого модуля предполагает, что его субмодули будут включены параллельно, а несколько приборов будут включены по схеме «полумост» с использованием внешних шин. Драйвер модуля при этом располагается непосредственно на клеммах прибора под силовой ошиновкой (

Рисунок 3).



Рисунок 1 – Модули в корпусах 140мм. M1HM (слева) и M1HV(справа)

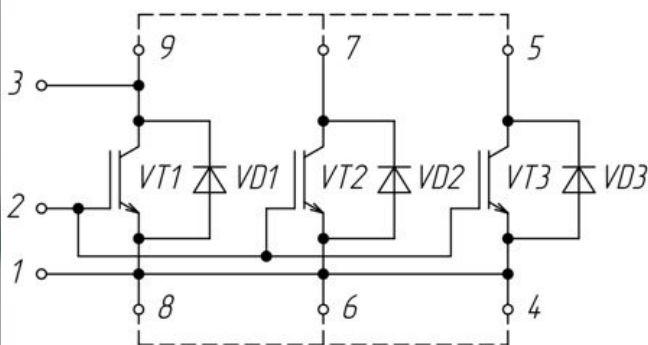
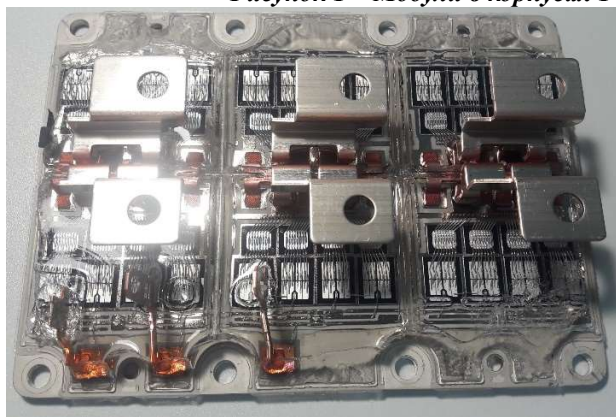


Рисунок 2 – Внутреннее устройство и схема 140мм модуля производства Infineon

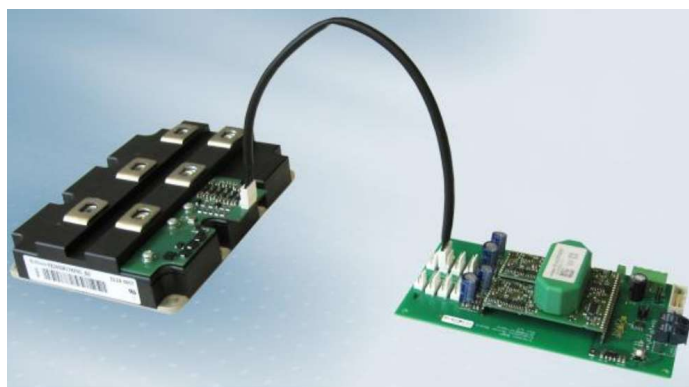


Рисунок 3 – Пример подключения драйвера

Результирующая индуктивность DC контура такой сборки выходит сравнительно высокой (90-150нГн). Шину AC конструктивно приходится размещать между шинами DC+ и DC-, что затрудняет возможность применения современных плоскопараллельных (бифилярных) ламинированных DC шин, а также масштабирование преобразователя. Высокий индуктивный импеданс такой ошиновки приводит к возникновению перенапряжений и колебаний в силовой цепи. Различие импеданса, приведенного к терминалам IGBT модуля, в свою очередь приводит к неравномерному распределению тока как между параллельно включенными модулями, так и между субмодулями в составе одного прибора, а также протеканию выравнивающих токов через цепи управления (

Рисунок 5). Определенное корпусом модуля положение силовых и сигнальных цепей приводит к тому, что в итоговой сборке платы драйверов располагаются на пути силовых шин

Рисунок 4), что ухудшает компоновку преобразователя, затрудняет его масштабирование через параллельное включение нескольких приборов. Данные ограничения и методы борьбы с ними нашли свое отражение в объемных руководствах по применению модулей, публикуемых производителями (

Рисунок 4).

Явление неравномерного распределения тока по субмодулям проиллюстрировано на

Рисунок 5, где красным показан суммарный ток модуля, а зеленым, голубым и черным – токи субмодулей одного прибора.

Таким образом можно выделить следующие ключевые ограничения форм-фактора 140мм: сложность обеспечения статического и динамического баланса токов между субмодулями в одном приборе, высокая индуктивность сборки по схеме «полумост», неудобное расположение силовых и сигнальных цепей, затрудняющее параллельное включение нескольких модулей и усложняющее конфигурацию ошиновки. Следует отметить, что эти ограничения становятся еще более весомыми в контексте применения современных быстродающих IGBT/SiC кристаллов.

Попытка преодолеть указанные недостатки в низковольтном сегменте была предпринята с выходом модулей Infineon PrimePack в 2006 году (

Рисунок 6). Идея модуля заключалась в параллельном включении нескольких субмодулей (до 6шт) по схеме полумост.

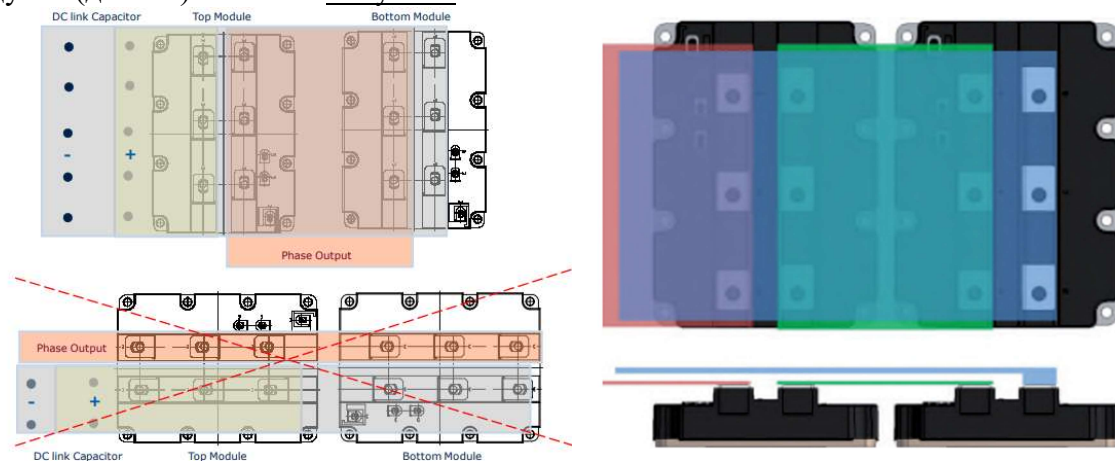


Рисунок 4 – Пример ошиновки модулей для включения «полумост» из руководства по применению Infineon

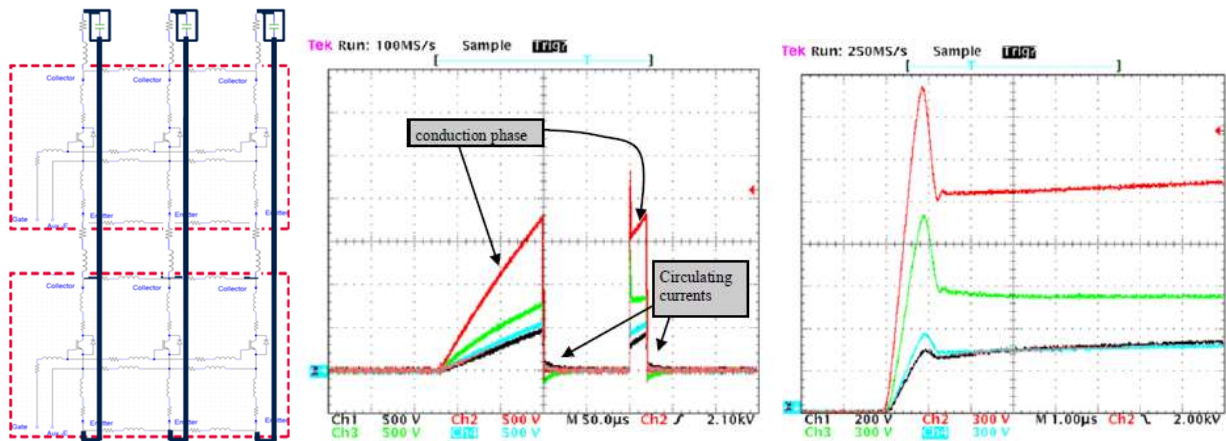


Рисунок 5 – Spice модель включения модуля с учетом паразитного импеданса шин, осциллограммы распределения токов в субмодулях. Материалы Infineon

Однако, идея не была развита до логического завершения. Модуль был выполнен по схеме полумост, однако неоптимальная конструкция внутренних шин приводила к большим и неравномерным индуктивностям, приложенным к субмодулям, что в свою очередь приводило к необходимости балансировки субмодулей через снижение скорости их переключения. Как результат – сравнительно высокие значения удельной индуктивности и неприемлемо высокие динамические потери. Дополнительно к этому возникла проблема перегрева протяженной и сравнительно узкой шины AC, температура которой в ходе работы модуля превышала 100°C. Указанную проблему попытались устранить, выпустив PrimePack3 (2015г.) с дополнительной дублирующей шиной AC (

Рисунок 6). Недостатки же в виде сложной внешней ошиновки и расположения драйвера на пути силовых шин были преодолены лишь частично.

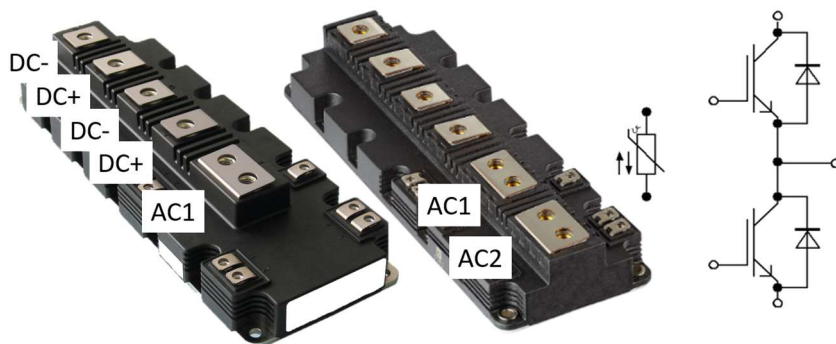


Рисунок 6 – Модули Infineon PrimePack2 (2006) и PrimePack3 (2015)

Перечисленные ограничения платформ 140mm/ Infineon PrimePack, накопленный опыт эксплуатации, развитие СПП кристаллов и технологий корпусирования сформировали новые обязательные требования и вводные данные для проектирования форм-фактора модулей следующего поколения: схема включения – полумост; низкая индуктивность силового контура; высокая внутренняя симметрия токов между субмодулями; удобство параллельного включения нескольких модулей для построения масштабируемых инверторов. Приборами, реализующими эти требования, стали разработки компании АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» – модули в корпусах MIXM и MIXV.

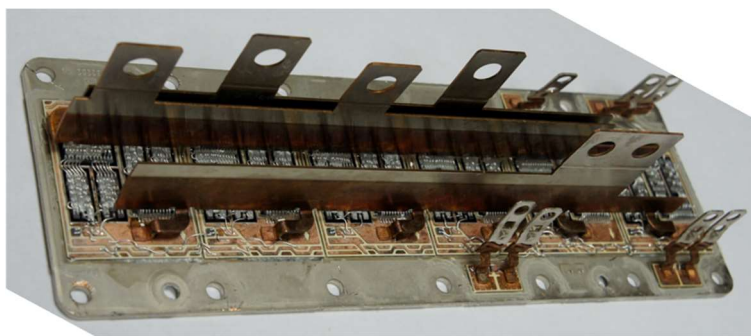


Рисунок 7 – Внутренняя структура PrimePack2

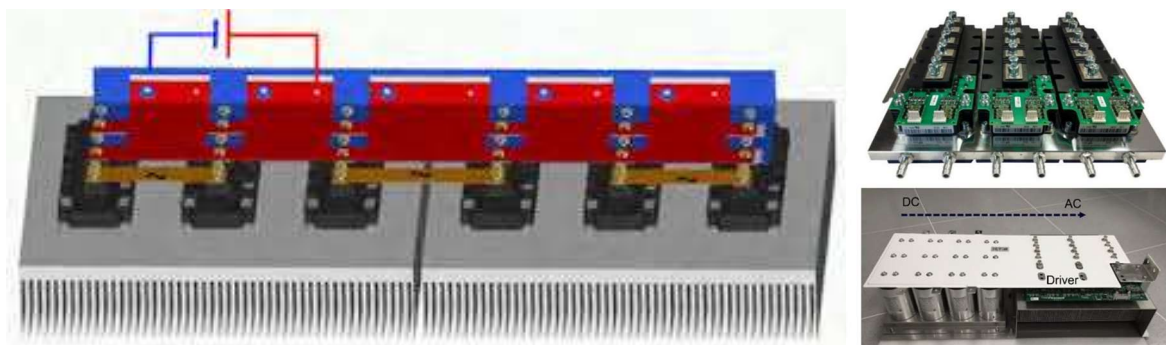


Рисунок 8 – Ошиновка PrimePack при параллельном включении, материалы Infineon

### Модули высокой мощности в корпусах MIXM и MIXV АО «Протон-Электротекс»

Внешний вид и схема внутренних соединений модулей MIXM (до 3300В) и MIXV (свыше 3300В) представлена на рисунке ниже.

Модули состоят из двух ключей, соединенных по схеме «полумост». За счёт особой топологии подложек и бифилярной конструкции силовых шин (Рисунок 8), индуктивность силового контура DC модуля составляет всего 20нГн.

Индуктивность силового контура модуля приводит к возникновению перенапряжений на кристалле, при этом величина перенапряжения определяется соотношением (1), где  $I_C$  –

величина тока коллектора,  $t_f$  – время спада тока коллектора,  $L_s$  – паразитная индуктивность контура DC,  $\Delta U$  – величина возникающего в цепи перенапряжения.

=

Опираясь на тот факт, что характеристическое время выключения  $t_f$  схоже у чипов одного поколения, можно вывести коэффициент  $L_s \cdot I_{C_{nom}}$  [нГн·А], являющийся характеристикой непосредственно конструкции модуля и позволяющий сравнивать между собой различные форм-факторы по критерию удельной индуктивности вне зависимости от их номинального тока.

Для сборки по схеме полумост на двух модулях 140мм 3400А с индуктивностью силового контура 100нГн величина такого коэффициента находится в районе 340 000 [нГн·А], для модуля MIXM номиналом 1400А и собственной индуктивностью 25нГн – 35 000 [нГн·А]. Таким образом, модуль в корпусе MIXM обеспечивает на порядок меньшую удельную индуктивность в прямом математическом смысле этого расхожего выражения.

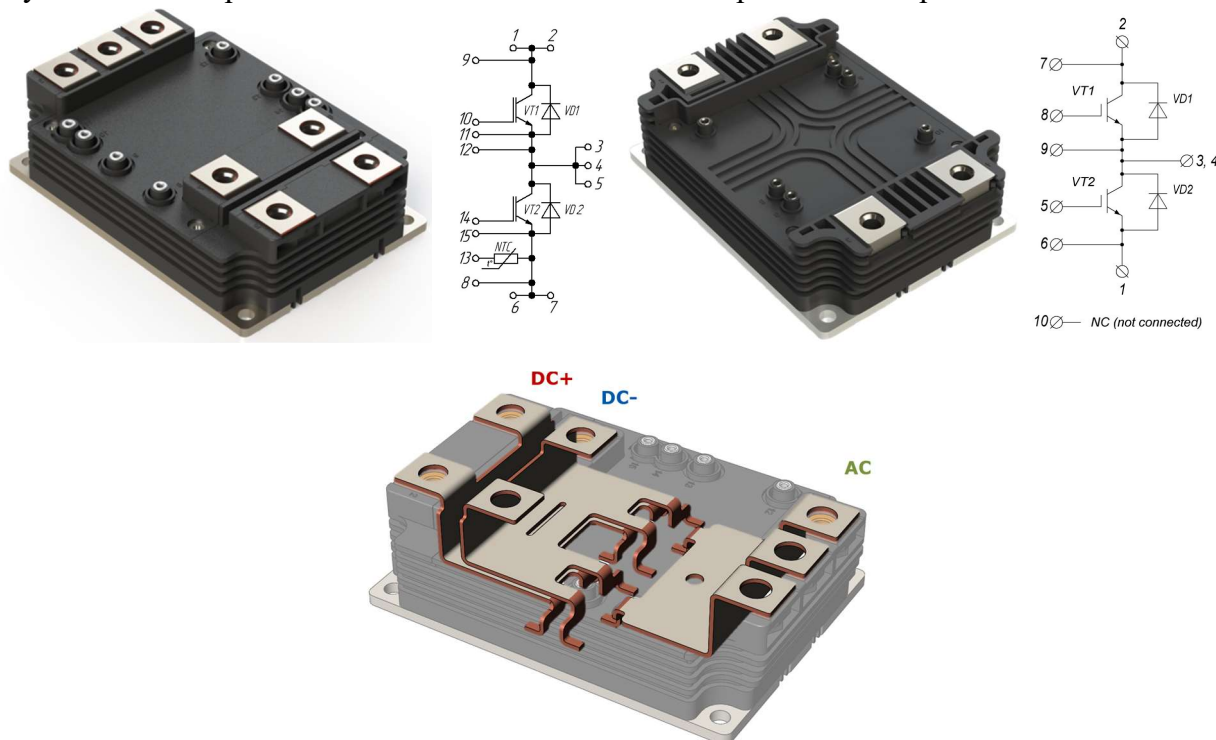


Рисунок 8 – Внешний вид и схема модуля MIXM (слева) и MIXV (справа) и бифилярная конструкция шин модуля MIXM

Столь малая величина удельной индуктивности, а следовательно и возникающих перенапряжений, кардинально отличает модули MIXM от приборов предыдущих поколений и открывает возможности построения быстродействующих ключей в данном корпусе, как на базе Si IGBT, так и высоковольтных SiC MOSFET.

Конструкция модуля MIXM и MIXV подразумевает четкое зонирование контактных соединений. Силовые выводы DC адаптированы для подключения к низкоиндуктивным ламинированным шинам, выводы AC расположены на противоположной от DC стороне модуля, а зона размещения драйвера не пересекается с зоной ошиновки. Такая конструкция не только обеспечивает значительно более удобную компоновку преобразователя, но и, что критически важно, дает возможность масштабировать конструкцию преобразователя путем параллельного включения нескольких приборов. Такой подход позволяет создавать модульные масштабируемые преобразователи, что значительно снижает затраты на их проектирование (Рисунок 9).

Возможность параллельного включения модулей обусловлена не только конфигурацией внешних соединений. Внутренняя конструкция модуля также высоко симметрична, имеет равные приведенные к каждому из субмодулей паразитные индуктивности, что обеспечивает оптимальное статическое и динамическое распределение токов между ними.

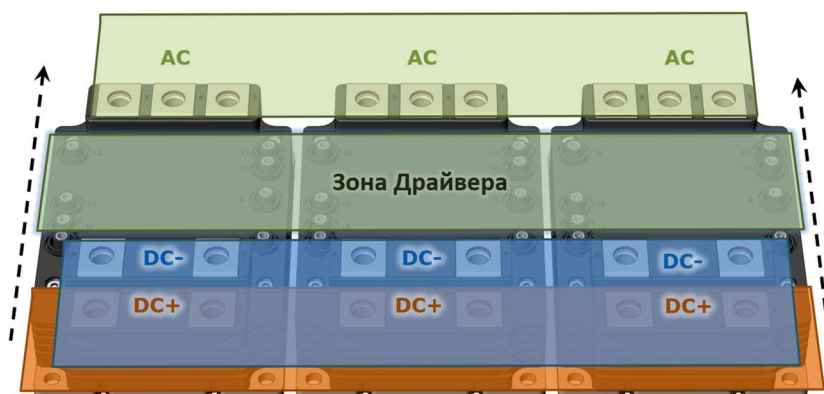


Рисунок 9 – Пример параллельного включения нескольких модулей типа MIXM

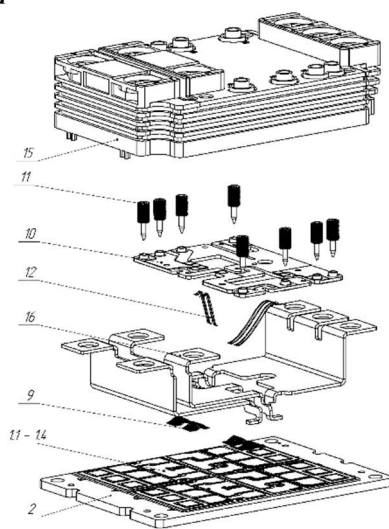


Рисунок 10 – Модуль MIXM, выдержка из патента на изделие

При высоких значениях  $di/dt$  и  $du/dt$  скорости коммутации, свойственных современным ПП ключам, критически важно обеспечить целостность сигналов управления через минимизацию паразитной индуктивной и емкостной связи силовых и управляющих цепей. Цепи затвора и эмиттера модуля MIXM на печатной плате узла управления расположены между собой бифилярно, а проволочные соединения платы с подложками организованы в виде низкоиндуктивной двухпроводной линии. Таким образом, подход по минимизации паразитных индуктивностей реализуется в полной мере применительно как к силовым, так и управляющим цепям модуля. Ключевые технические решения в конструкции приборов MIXM и MIXV являются уникальными, что нашло свое отражение в патентах на эти приборы (

Рисунок 10)

#### Дальнейшие пути развития конструкции силовых модулей высокой мощности

Как хорошо проиллюстрировано выше, эксплуатационные характеристики силового полупроводникового прибора определяются не только технологией применяемых кристаллов, но и свойствами конструкции его корпуса. Помимо снижения индуктивности силовых и управляющих цепей, дальнейшие пути оптимизации характеристик конструкции силовых полупроводниковых приборов могут быть направлены на повышение надежности и циклоустойкости, улучшение теплоотвода, расширение возможности интеллектуального контроля за состоянием модуля, повышения степени интеграции модуля и преобразователя, снижение себестоимости, повышении напряжения изоляции. Что характерно, зачастую эти параметры лежат между собой в конкурирующих соотношениях, что на практике приводит к разделению модулей на рыночные ниши, где свойства корпуса наиболее полно отражают требования конкретной сферы применения прибора. Как пример, можно выделить модули в общепромышленном исполнении, оптимизированные по критерию себестоимости, однако демонстрирующие средние показатели циклоустойкости, изоляции, паразитной индуктивности; модули транспортного исполнения, имеющие повышенное напряжение

изоляции и оптимизированные по критерию циклоустойкости ценой увеличения себестоимости и теплового сопротивления; модули на базе SiC MOSFET для электромобилей, оптимизированные по критерию индуктивности цепей, теплоотвода, удобства параллельного включения нескольких приборов.

Одним из основных механизмов отказа СПП является достижение кристаллом предельной рабочей температуры, при превышении которой кристалл теряет блокирующие характеристики с развитием неконтролируемого лавинного пробоя. Таким образом, задача реализации наилучшего теплоотвода от кристалла к охладителю при сохранении изоляционных характеристик является одной из ключевых при проектировании СПП модулей.

Для оценки допустимого тепловыделения и сравнения IGBT модулей по этому критерию используется параметр  $R_{th(j-c)}$ , характеризующий тепловое сопротивление кристалл-основание модуля. Однако, для полноценного расчета системы охлаждения принято строить полную тепловую модель цепи кристалл – охлаждающая среда. На рисунке (

Рисунок 11) схематически изображена структура теплоотвода модуля общепромышленного исполнения с медным основанием и изоляционными DBC подложками на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамики, размещенного на водяном охладителе. Аналитическая оценка температурного градиента приведена для кристалла размером 12мм\*12мм с выделяемой мощностью 250Вт. Толщина слоя термопасты принята равной 50мкм.

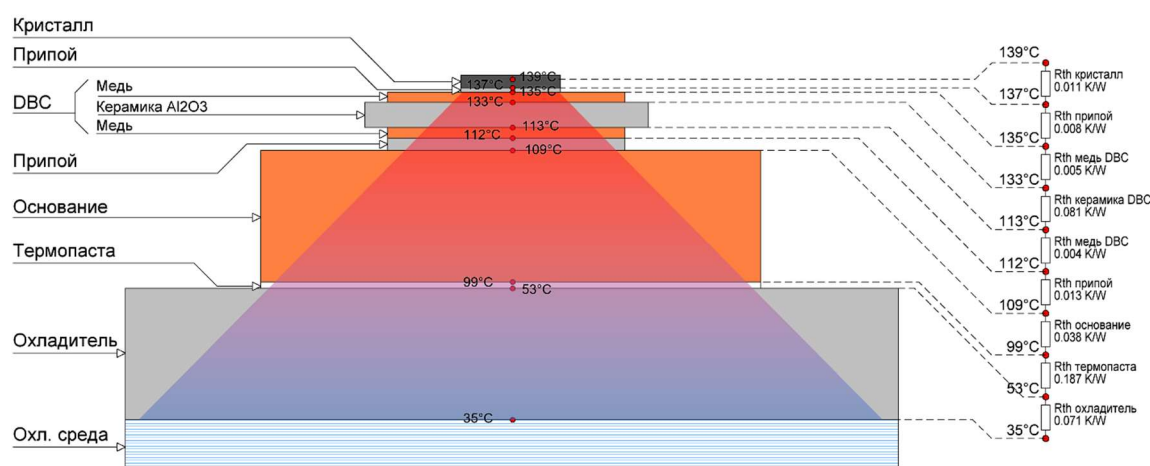


Рисунок 11 – Карта температур в структуре IGBT модуля

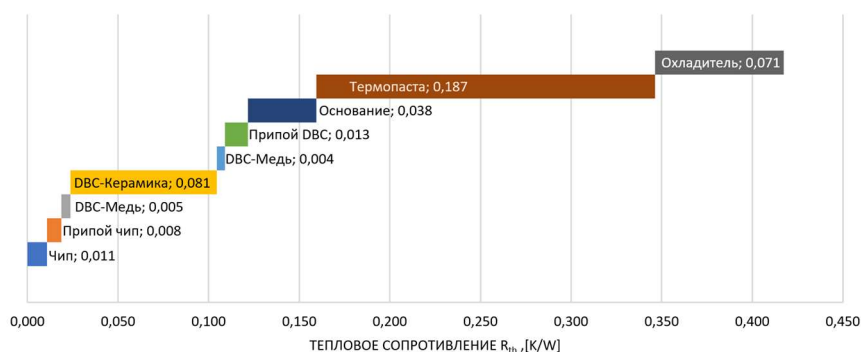
В приведенном примере суммарное тепловое сопротивление кристалл-основание составило 0,16 К/Вт, суммарное тепловое сопротивление всей системы охлаждения – 0,42 К/Вт, причем доминирующий вклад в тепловое сопротивление кристалл среда вносят: DBC подложка – 0,081 К/Вт; термоинтерфейс модуль-охладитель – 0,187 К/Вт; тепловое сопротивление охладителя – 0,071 К/Вт. Данные элементы конструкции теплоотвода (

Рисунок 12) становятся приоритетными целями для оптимизации.

Как показано выше, тепловое сопротивление интерфейса модуль-охладитель по величине сопоставимо с тепловым сопротивлением  $R_{th(j-c)}$  самого модуля (

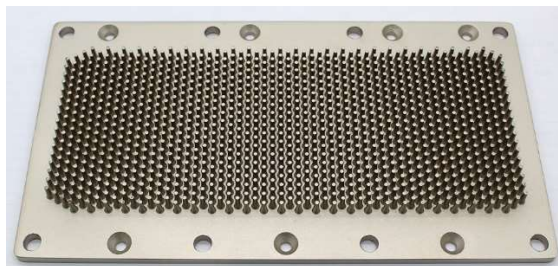
Рисунок 12). Логичным шагом оптимизации конструкции модуля становится переход к приборам с непосредственным охлаждением, наиболее распространенным примером которого является использование оснований, подразумевающих непосредственный контакт модуля с охлаждающей средой (

Рисунок 13-15). Такая технология не только исключает переход модуль-охладитель из тепловой цепи, но и увеличивает эффективную площадь теплообмена с охлаждающей средой.



**Рисунок 12 – Совокупное тепловое сопротивление системы кристалл-охладитель**

Вторым по величине вклада в совокупное тепловое сопротивление компонентом является изолирующая DBC подложка. Существует ряд подходов, позволяющих преодолеть это ограничение. Первый – изменение материала изолятора, второй – интеграция изолятора в состав основания, а также их комбинация. Так, компания Mitsubishi представила на рынок модули в корпусах LV100 и HV100, в которых AlN керамические подложки металлургически интегрированы в алюминиевое основание, а рисунок топологии сформирован алюминиевыми проводниками непосредственно на керамике. Такой подход позволил исключить несколько компонентов и тепловых переходов из конструкции модуля, а технология металлургической интеграции AlN керамики в Al основание в теории обеспечивает повышенную стойкость модулей к термоциклам. Также ведущими компаниями ведутся разработки в направлении применения кристаллов алмаза в качестве изолирующих подложек, основным преимуществом которых могла бы стать непревзойденная величина теплопроводности.



**Рисунок 13 – Основание модуля типа Pin-Fin для непосредственного охлаждения**



**Рисунок 14 – Модуль с непосредственным водяным охлаждением производства Danfoss**

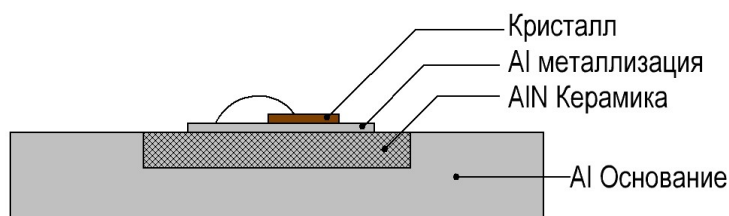


Рисунок 15 – Схематическое изображение металлургических интегрированных AlN изоляторов в Al основание в приборах Mitsubishi LV100 и HV100

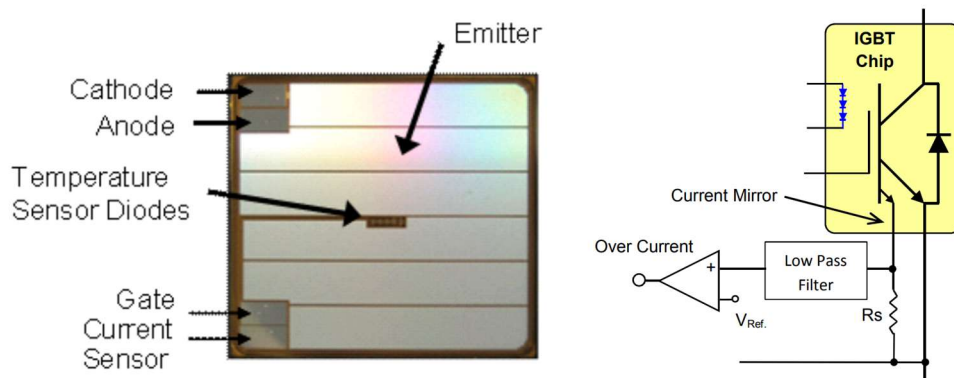


Рисунок 16 – Пример IGBT кристалла с датчиком температуры и токоизмерительным отводом эмиттера

Помимо оптимизации теплоотвода, все большее распространение получают интеллектуальные системы контроля температуры кристалла и мгновенных значений тока в реальном времени. Для этих целей модули оснащаются кристаллами, имеющими токоизмерительный отвод эмиттера, а также термодатчик, выполненный непосредственно в теле кристалла. Внешний вид и структурное обозначение подобных кристаллов представлен на рисунке ниже.

### Заключение

Задача разработки IGBT модулей является мультидисциплинарной и затрагивает не только проектирование электромагнитных взаимодействий в конструкции прибора, но и явлений теплопереноса, вопросы обеспечения требуемой изоляции, надежности и долговечности, а также всестороннее рассмотрение модуля в контексте его последующего применения в составе системы более высокого уровня. Каждый из указанных аспектов достоин отдельного и детального рассмотрения, выходящего за рамки обзорной статьи.

На примере мощных IGBT модулей с основанием 140мм в статье рассмотрены современные тенденции развития конструкции силовых полупроводниковых приборов. Показано, как накопленный опыт эксплуатации, рост скорости коммутации СПП кристаллов, развитие технологий корпусирования формируют требования и вводные данные для проектирования новых форм-факторов модулей следующего поколения, таких как MIXM и MIXV. Ключевым отличием приборов данного типа стала на порядок меньшая индуктивность силовых и управляющих цепей, а также продвинутая компоновка и внутренняя структура прибора, облегчающая параллельное включение нескольких модулей. Что, в свою очередь, открывает возможность разработки масштабируемых преобразователей, а также применения в этом форм факторе не только быстродействующих Si IGBT, но и высоковольтных SiC MOSFET кристаллов. Дополнительно рассмотрены дальнейшие возможные пути развития конструкции IGBT модулей, включающие в себя кардинальную модернизацию структуры теплоотвода, а также использование кристаллов с возможностью контроля температуры чипа и мгновенных значений тока в реальном времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bayerer, R. Power circuit design for clean switching/ R. Bayerer, D. Domes// 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. – 2010. – pp.1-6.

2. Motto, E.R. IGBT Module with User Accessible On-Chip Current and Temperature Sensors/ E. R. Motto, J. F. Donlon // Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2012. – pp. 176-181
3. Bäßler, M. Research of current distribution in IGBT modules with multiple chips in parallel/ Bäßler M., Münzer M., Burkert S. //Proc. PCIM Europe Conf. – 2005.
4. Application Note: Design reference on IGBT paralleling, – Infineon Technologies. – 2009. –18p,
5. Messelke, C. Monte-Carlo simulation of paralleled IGBT modules from worst case simulations to a full statistical approach/ C.Messelke, P.Kanschat// Proc. PCIM Europe Conf. – 2007.
6. Application Note: Design reference on IGBT paralleling, – Infineon Technologies. – 2009. –18p.
7. Флоренцев, С.Н. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники / С.Н. Флоренцев // Современные технологии автоматизации. – 2004. – №2. – С.20-30.
8. Евсеев, Ю.А. Состояние и перспективы развития российской полупроводниковой элементной базы силовой электроники / Ю.А. Евсеев, В.Д. Ковалев, А.М. Сурма // Электро. – 2005. – №5. – С.2-14.
9. Minato, T. Future Trend of Si Power Device / T. Minato, K. Sato // IEICE Electronics Express. – 2014. – V.11. – №3. – P.1-17.
10. Vobecky, J. The Current Status of Power Semiconductors / J. Vobecky // Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics. – 2015. – V.28. – №2. – P.193-203.
11. Флоренцев, С.Н. Силовые IGBT-модули – основа современного преобразовательного оборудования / С.Н. Флоренцев // Электронные компоненты. – 2002. – №6. – С.11-17.
12. Bouarroudj, M. Degradation behavior of 600 V–200 A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions / M. Bouarroudj, Z. Khatir, J.P. Ousten, F. Badel, L. Dupont, S. Lefebvre // Microelectronics Reliability. – 2007. – V.47. – P.1719-1724.
13. Morozumi, A. Reliability of Power Cycling for IGBT Power Semiconductor Modules / A. Morozumi, K. Yamada, T. Miyasaka, S. Sumi, Y. Seki // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – V.39. – No.3. – P.665-671.
14. Ciappa, M. Selected failure mechanisms of modern power modules / M. Ciappa // Microelectronics Reliability. – 2002. – V.42. – P.653–667.
15. Lu, H. Design for reliability of power electronics modules / H. Lu, C. Bailey, C. Yin // Microelectronics Reliability. – 2009. – V.49. – P.1250–1255.
16. Busca, C. Modeling lifetime of high power IGBTs in wind power applications - An overview / C. Busca // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). – 2011. – P.1408-1413.
17. Матюхин, С.И. Компьютерное моделирование деформаций, возникающих при производстве силовых полупроводниковых модулей паяной конструкции / С.И. Матюхин, Д.О. Малый, А.С. Вишняков // Сб. трудов III Междунар. научно-практической конф. «Современные проблемы физико-математических наук». – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева. – 2017. – С.246-249.
18. Матюхин, С.И. Компьютерное моделирование термомеханических деформаций, возникающих при производстве и эксплуатации силовых полупроводниковых модулей паяной конструкции / С.И. Матюхин, К.Ю. Фроленков, Д.О. Малый, А.С. Вишняков, Е.Ю. Орлов, М.Д. Санников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. №4-1 (336). С.35-41.
19. Матюхин, С.И. Компьютерное моделирование теплопереноса в силовых IGBT-модулях паяной конструкции / С.И. Матюхин, Д.О. Малый, А.С. Вишняков, Е.А. Заночкин, А.Д. Петрухин // Сб. трудов III Междунар. научно-практической конф. «Современные проблемы физико-математических наук», – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2017. С.242-245.
20. Матюхин, С.И. Компьютерное моделирование переходного теплового сопротивления IGBT-модулей паяной конструкции / С.И. Матюхин, Д.О. Малый, А.С. Вишняков // Сб. трудов IV Междунар. научнопрактической конф. «Современные проблемы физико-математических наук», – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2018. С.270-273.
21. Давидов, П.Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов / П.Д. Давидов, - М.: Энергия, 1967. – 144 с.
22. Lostetter, A.B. An overview to integrated power module design for high power electronics packaging / A.B. Lostetter, F. Barlow, A. Elshabini // Microelectronics Reliability. 2000. V.40. P.365-379.
23. Xu, Y. Misconception of Thermal Spreading Angle and Misapplication to IGBT Power Modules / Y. Xu, D.C. Hopkins // IEEE Applied Power Electronics Conf., Ft. Worth, TX, March 16-20, 2014.

**Малый Денис Олегович**

АО «Протон-Электротекс» г. Орел,  
ведущий инженер-исследователь  
Россия, 302040, г. Орел, Лескова 19  
Тел.+79208123868  
E-mail: d.malyu@live.com

**Матюхин Сергей Иванович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доктор физико-математических наук, заведующий  
кафедрой технической физики и математики  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 41-98-02  
E-mail: sim1@mail.ru

MALYI D.O., MATYUKHIN S.I.

**MODERN DESIGN SOLUTIONS IN HIGH POWER IGBT MODULES**

**Abstract.** *The article considers modern approaches to the design of power semiconductor modules. On the example of devices with 140mm base and MIXM and MIXV modules by JSC "Proton-Electrotex" it is shown how the design of modules has developed along the way of reducing the inductance of power circuits and optimizing the layout of internal and external connections. Additionally, the article considers further possible ways of IGBT modules design development, including modernization of heat sink structure, as well as the use of crystals with integrated temperature and instantaneous current sensors.*

**Keywords:** *IGBT modules, power semiconductor modules, traction electric drive, electric power converters, inductance of power circuits, parallel connection of IGBT modules, thermal management in power semiconductor devices, thermal model of power module, semiconductor crystal temperature control, control of instantaneous current value of semiconductor chip.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Bayerer, R. Power circuit design for clean switching/ R. Bayerer, D. Domes// 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. – 2010. – pp.1-6.
2. Motto, E.R. IGBT Module with User Accessible On-Chip Current and Temperature Sensors/ E. R. Motto, J. F. Donlon // Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2012. – pp. 176-181
3. Bäßler, M. Research of current distribution in IGBT modules with multiple chips in parallel/ Bäßler M., Münzer M., Burkert S. //Proc. PCIM Europe Conf. – 2005.
4. Application Note: Design reference on IGBT paralleling, – Infineon Technologies. – 2009. –18p,
5. Messelke, C. Monte-Carlo simulation of paralleled IGBT modules from worst case simulations to a full statistical approach/ C.Messelke, P.Kanschä// Proc. PCIM Europe Conf. – 2007.
6. Application Note: Design reference on IGBT paralleling, – Infineon Technologies. – 2009. –18p.
7. Florencev, S.N. Sovremennoe sostojanie i prognoz razvitiya priborov silovoj jelektroniki / S.N. Florencev // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. – 2004. – #2. – S.20-30.
8. Evseev, Ju.A. Sostojanie i perspektivy razvitiya rossijskoj poluprovodnikovoj jelementnoj bazy silovoj jelektroniki / Ju.A. Evseev, V.D. Kovalev, A.M. Surma // Jelektro. – 2005. – #5. – S.2-14.
9. Minato, T. Future Trend of Si Power Device / T. Minato, K. Sato // IEICE Electronics Express. – 2014. – V.11. – #3. – P.1-17.
10. Vobecky, J. The Current Status of Power Semiconductors / J. Vobecky // Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics. – 2015. – V.28. – #2. – P.193-203.
11. Florencev, S.N. Silovye IGBT-moduli – osnova sovremennogo preobrazovatel'nogo oborudovaniya / S.N. Florencev // Jelektronnye komponenty. – 2002. – #6. – S.11-17.
12. Bouarroudj, M. Degradation behavior of 600 V–200 A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions / M. Bouarroudj, Z. Khatir, J.P. Ousten, F. Badel, L. Dupont, S. Lefebvre // Microelectronics Reliability. – 2007. – V.47. – P.1719-1724.
13. Morozumi, A. Reliability of Power Cycling for IGBT Power Semiconductor Modules / A. Morozumi, K. Yamada, T. Miyasaka, S. Sumi, Y. Seki // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – V.39. – No.3. – P.665-671.
14. Ciappa, M. Selected failure mechanisms of modern power modules / M. Ciappa // Microelectronics Reliability. – 2002. – V.42. – P.653–667.
15. Lu, H. Design for reliability of power electronics modules / H. Lu, C. Bailey, C. Yin // Microelectronics Reliability. – 2009. – V.49. – P.1250–1255.
16. Busca, C. Modeling lifetime of high power IGBTs in wind power applications - An overview / C. Busca // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). – 2011. – P.1408-1413.
17. Matjuhin, S.I. Kompjuternoe modelirovanie deformacij, vznikajushhih pri proizvodstve silovyh poluprovodnikovyh modulej pajanoj konstrukcii / S.I. Matjuhin, D.O. Malyj, A.S. Vishnjakov // Sb. trudov III Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konf. «Sovremennye problemy fiziko-matematicheskikh nauk». – Orjol: OGU im. I.S. Turgeneva. – 2017. – S.246-249.
18. Matjuhin, S.I. Kompjuternoe modelirovanie termomechanicheskikh deformacij, vznikajushhih pri proizvodstve i jekspluatacii silovyh poluprovodnikovyh modulej pajanoj konstrukcii / S.I. Matjuhin, K.Ju. Frolenkov, D.O. Malyj, A.S. Vishnjakov, E.Ju. Orlov, M.D. Sannikov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2019. #4-1 (336). S.35-41.
19. Matjuhin, S.I. Kompjuternoe modelirovanie teploperenosa v silovyh IGBT-moduljah pajanoj konstrukcii / S.I. Matjuhin, D.O. Malyj, A.S. Vishnjakov, E.A. Zanochkin, A.D. Petruhin // Sb. trudov III Mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konf. «Sovremennye problemy fiziko-matematicheskikh nauk», - Orjol: OGU im. I.S. Turgeneva, 2017. S.242-245.
20. Matjuhin, S.I. Kompjuternoe modelirovanie perehodnogo teplovogo soprotivleniya IGBT-modulej pajanoj konstrukcii / S.I. Matjuhin, D.O. Malyj, A.S. Vishnjakov // Sb. trudov IV Mezhdunar. nauchnoprakticheskoy konf. «Sovremennye problemy fiziko-matematicheskikh nauk», - Orjol: OGU im. I.S. Turgeneva, 2018. S.270-273.
21. Davidov, P.D. Analiz i raschet teplovyh rezhimov poluprovodnikovyh priborov / P.D. Davidov, - M.: Jenergija, 1967. – 144 s.
22. Lostetter, A.B. An overview to integrated power module design for high power electronics packaging / A.B. Lostetter, F. Barlow, A. Elshabini // Microelectronics Reliability. 2000. V.40. P.365-379.

23. Xu, Y. Misconception of Thermal Spreading Angle and Misapplication to IGBT Power Modules / Y. Xu, D.C. Hopkins // IEEE Applied Power Electronics Conf., Ft. Worth, TX, March 16-20, 2014.

**Malyj Denis Olegovich**

Proton-Electrotex, JSC, Orel.  
Lead research engineer  
Russia, 302040, g. Orel, Leskova 19  
Ph.+79208123868  
E-Mail: d.malyy@live.com

**Matyukhin Sergey Ivanovich**

Orel State University, Orel  
DSc, Head of the Department of Technical Physics and  
Mathematics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph. (4862) 41-98-02  
E-mail: sim1@mail.ru

© Малый Д.О., Матюхин С.И., 2025

ТАРАСОВ Я.О.

## АРХИТЕКТУРА СОВРЕМЕННОГО ДРАЙВЕРА СИЛОВЫХ IGBT КЛЮЧЕЙ

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные параметры драйверов IGBT. Приведены критерии для выбора драйвера. Рассмотрены схемы управления затвором. Определены основные и расширенные защитные функции и возможные способы их реализации. Рассмотрены единичные драйверы и драйверы для управления параллельного включенных IGBT. Приведены особенности построения параллельного драйвера.

**Ключевые слова:** IGBT, драйвер, управление затвором, параллельное включение транзисторов, защита транзистора.

### Введение

Для разработки мощных преобразователей в качестве основных элементов используют силовые IGBT ключи. Для управления IGBT необходимо устройство, способное генерировать сигналы управления затвором IGBT. Для этой цели используется драйвер. Основной функцией драйвера является заряд емкости затвора транзистора до отпирающего значения напряжения и разряд емкости затвора до запирающего значения напряжения.

### Основная часть

#### 1 Назначение драйвера

Основной функцией драйвера является отпирание и запираание IGBT путем подачи на затвор положительного напряжения  $V_{GE(on)} = +15$  В для заряда затвора до отпирающего значения и отрицательного напряжения  $V_{GE(off)} = -5...-15$  В для разряда емкости затвора до запирающего уровня [1]. Наиболее важными требованиями к драйверам IGBT являются: гальваническое разделение управляющих и силовых цепей IGBT-ключей; способность включать и выключать IGBT с минимальными потерями переключения; способность переключать IGBT с оптимальной частотой (выходная мощность драйвера должна соответствовать управляемому IGBT); наличие защиты от короткого замыкания, пониженного напряжения питания, защита IGBT от перенапряжения при выключении.

#### 2 Основные характеристики драйвера

К основным характеристикам драйвера относятся:

- Напряжение питания драйвера. Данный параметр определяется исходя из требований по питанию DC-DC. Обычно составляет +15В.
- Выходной импульсный ток. Параметр который определяет максимальный (пиковый) ток управления затвором при общем сопротивлении цепи затвора  $R_G$  и амплитуде управляющего напряжения на затворе  $\Delta U_G$ . Определить выходной ток драйвера можно по формуле:

где  $\Delta U_G$  – размах напряжения на затворе;  $R_G$  – сопротивление внешнего затворного резистора,  $R_E$  – сопротивление резистора эмиттера;  $R_{GINT}$  – сопротивление встроенного резистора затвора.

- Частота ШИМ. Параметр, определяющий максимальную частоту переключения силовых ключей. На данный параметр влияет выходная мощность драйвера и мощность, рассеиваемая резисторами затвора. С повышением сопротивления затворного резистора мощность, рассеиваемая выходным каскадом, при заданной частоте коммутации уменьшается.

U

- Напряжение изоляции. Максимально допустимое напряжение изоляции между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Определяет каким транзистором может управлять драйвер.
- Выходная мощность драйвера. Рассчитывается по формуле:

=

где  $Q_G$  – заряд затвора транзистора (приводится в документации на транзистор);  
f

$s$  Минимальное значение сопротивления затворного резистора. Параметр указывается в

документации на драйвера, однако в ряде случаев необходим индивидуальный подбор для оптимизации динамических характеристик.

U

– Напряжение коллектор-эмиттер. Определяет класс транзистора (например, 1200 В, 1700 В). В соответствии с  $U_{CE}$  драйвер должен обеспечивать защиту по превышению этого напряжения. Помимо этого  $U_{CE}$  определяет тестовое напряжение изоляции драйвера  $U_{ISOL}$ .

– Параметр, характеризующий стойкость к максимальной скорости нарастания напряжения (первичного к вторичному), которую способен выдерживать драйвер. Для 12 и 17 класса обычно 3 базовые функции

### Включение и выключение транзистора

Для переключения IGBT на затворе необходимо формировать напряжение  $V_{G(on)} = +15$  В для включения (рисунок 1) и отрицательное напряжение  $V_{G(off)} = -9$  В для выключения транзистора (рисунок 2) [2]. На рисунках 3, 4 изображены осциллограммы коммутации номинальных токов и напряжений. Условия проверки функционирования драйвера:  $V_{ce\ max} -$

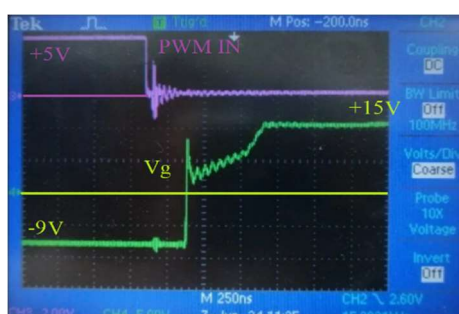


Рисунок 1 – Осциллограмма включения



Рисунок 2 – Осциллограмма выключения

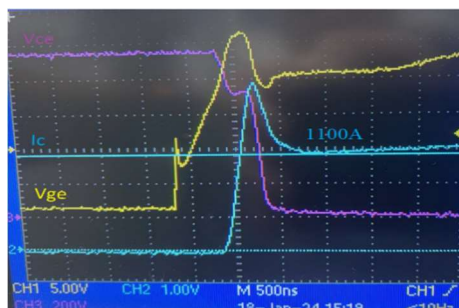


Рисунок 3 – Рабочая характеристика включения

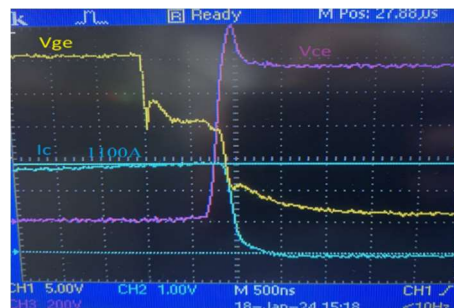


Рисунок 4 – Рабочая характеристика выключения

### Затворный резистор

Для ограничения затворного тока и оптимизации динамических характеристик в цепь затвора устанавливают затворные резисторы [3]. При переключении транзистора возникают динамические потери на включении и выключении. В большинстве случаев при увеличении сопротивления затворного резистора уменьшается скорость переключения и растут динамические потери. Однако для точного определения этой зависимости следует изучить график зависимости, приводимый в технической документации на транзистор. На рисунке 5 представлена зависимость энергии транзистора модуля от сопротивления затворного резистора. На рисунке 6 представлена зависимость энергии диода модуля при обратном восстановлении от сопротивления затворного резистора.

М

;

М

о

448

у

л

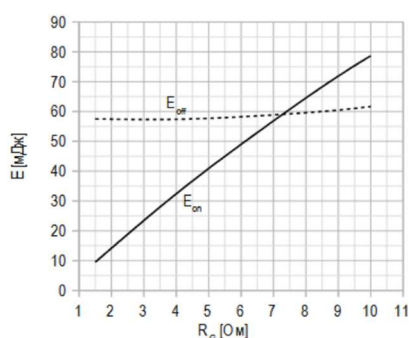


Рисунок 5 – Зависимость потерь энергии на транзисторе от сопротивления затворного резистора, для модуля MIDA-HB12SA-450N

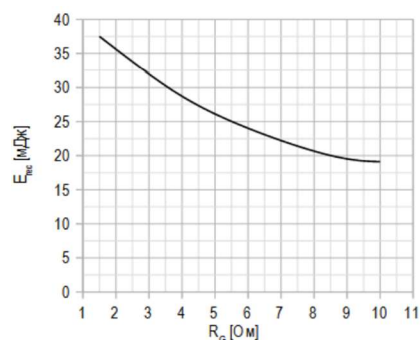


Рисунок 6 – Зависимость потерь энергии диода при обратном восстановлении от сопротивления затворного резистора, для модуля MIDA-HB12SA-450N

#### 4 Расширенные функции и их реализация

Помимо основных функций драйвер IGBT должен выполнять расширенные функции, обеспечивающие гарантированную защиту транзистора при аварийной ситуации [4]. В таблице 1 приведены защиты, которые являются обязательными, однако в ряде драйверов можно встретить дополнительные защиты, такие как: защита от повышенной температуры, максимальной частоте управления и т.д. Ниже рассмотрим варианты реализации всех защитных функций.

Таблица 1 – Защитные функции драйверов

Таблица 1 – Защитные функции драйверов		
Аварийная ситуация	Последствия	Защита драйвера
Сбой цепей управления	Возникновение сквозного тока	Блокировка одновременного включения (Interlock)
Наложение открытых состояний ключей полумоста		Формирование «мертвого времени» на переключение (deadtime)
		Подавление эффекта Миллера (Miller)
Перенапряжение цепи управления затвором	Перенапряжение	Защита перехода затвор-эмиттер
Коммутационные импульсы напряжения в нагрузке		Защита перехода коллектор-эмиттер
Выход транзистора из ключевого режима	Превышение по току	Защита от пониженного питания драйвера ( $U_{vlo}$ )
Превышение предельно-допустимого тока транзистора		Защита по ненасыщению (DESAT)
Перегрев силового модуля	Выход из строя	Защита от повышенной температуры

#### Защита перехода затвор-эмиттер

Для ограничения тока КЗ в драйвере реализована защитная цепь между затвором и эмиттером (рисунок 7).

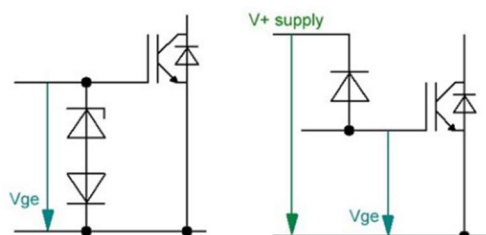


Рисунок 7 – Ограничения напряжения на затворе

### Защита от выхода транзистора из насыщения (DESAT)

DESAT предназначен для защиты IGBT от короткого замыкания и токов высокой амплитуды [5]. На рисунках 8, 9 приведен принцип обнаружения короткого замыкания. После начала включения IGBT цепь с задержкой монитора DESAT 8 мкс (рисунок 10) начинает контролировать падение напряжения  $V_{CE}$  через блокирующий диод коллектора. Задержка монитора вводится чтобы избежать ошибочного срабатывания защиты при включении IGBT, причем она должна составлять не более 10 мкс, чтобы транзистор не успел выйти из строя при коротком замыкании. В случае превышения падения напряжения  $V_{CE}$  заданного значения  $V_{CEref}$  (задается стабилитроном) компаратор переключается, сигнал заблокируется и транзистор «мягко» (плавно понизит напряжение на затворе) выключится (рисунок 11). Драйвер может обладать функцией сброса защиты. После истечения заданного времени блокировки драйвер восстановит работу без внешнего сброса. Время блокировки может варьироваться в зависимости от драйвера и частоты работы, обычно составляет от 1...1000 мс. На рисунке 12 показана осциллограмма автоматического сброса ошибки DESAT с блокировкой 1,5 мс. На рисунке 13 показана рабочая кривая тока и напряжения коллектора при срабатывании DESAT на номинальном токе и напряжении.

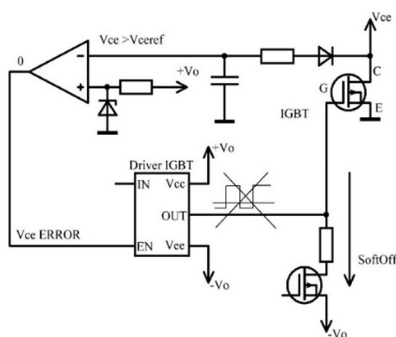


Рисунок 8 – Схема мониторинга напряжения  $V_{CE}$

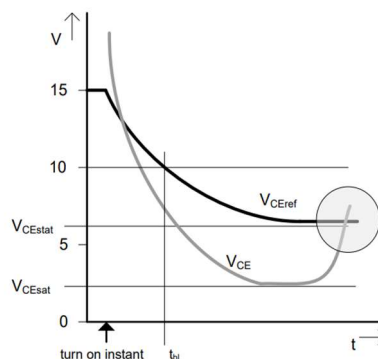


Рисунок 9 – Схема мониторинга напряжения  $V_{CE}$



Рисунок 10 – Время задержки на срабатывание монитора DESAT

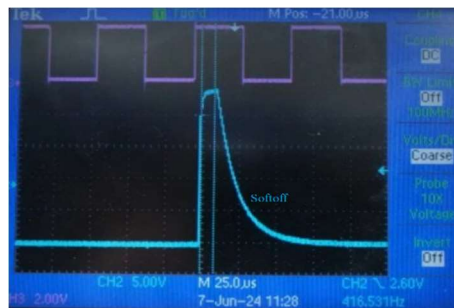


Рисунок 11 – Осциллограмма работы режима Softoff (плавное выключение)



Рисунок 12 – Время блокировки управления каналом 1,5 мс

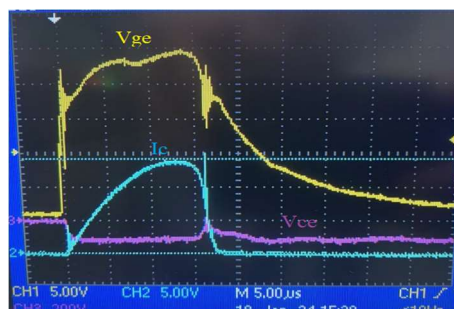


Рисунок 13 – Кривая тока и напряжения коллектора при срабатывании DESAT

### Защита по питанию

V<sub>LO</sub> (Under Voltage LockOut) – защита от пониженного напряжения питания является обязательной защитой, поскольку недостаточный уровень напряжения питания приведет к уменьшению уровня напряжения затвор-эмиттер  $V_{GE}$ , что может привести ключ в линейный режим работы и тепловому пробую. Обычно уровень срабатывания защиты настраивают на 12-13,5 В, а отключение при 14-14,5 В. Обязательно наличие в схеме гистерезиса, чтобы избежать высокочастотной модуляции сигнала управления при перегрузке выхода DC/DC - преобразователя драйвера. Функциональная схема реализации контроля напряжения питания показана на рисунках 14, 15. Стабилитрон и резистивный делитель задают порог срабатывания защиты по питанию, резистором обратной связи регулируется величина гистерезиса.

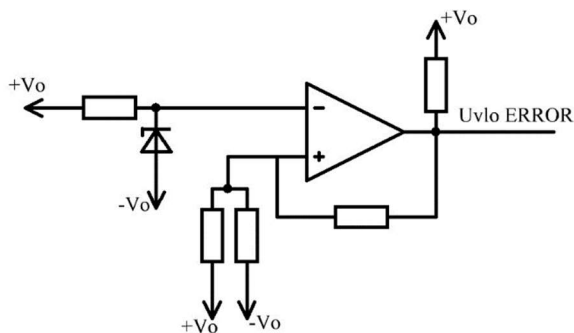


Рисунок 14 – Схема монитора полного размаха  $V_{GE}$

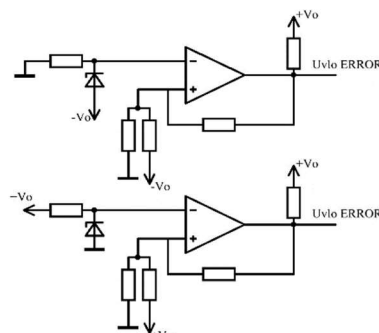


Рисунок 15 – Схема монитора положительного и отрицательного напряжения  $V_{GE}$

### Защита от повышенной температуры IGBT

Защита от перегрева реализуется схемой контроля, подключенной к NTC термистору модуля IGBT. В документации на термистор уточняется зависимость сопротивления  $R_{NTC}$  от температуры. Далее выбираются необходимые значения  $R_{NTC}$  соответствующие желаемой температуре включения и отключения защиты, наиболее важными является диапазон +80...+120°C. На рисунке 16 представлено схемное решение защиты от повышенной температуры. При нагреве модуля сопротивление термистора с отрицательным температурным коэффициентом уменьшается, напряжение на входе компаратора падает компаратор переключается, выдавая сигнал ошибки на входной каскад драйвера.

### Защита от превышения напряжения (Active Clamping)

При избыточном напряжении с цепи коллектор-эмиттер часть напряжения передаётся на затвор, в результате чего транзистор приоткрывается и «подсаживает» силовое напряжение. Базовая схема, иллюстрирующая этот принцип, приведена на рисунке 17. Суммарное напряжение цепочки стабилитронов-супрессоров, подключенных между коллектором и затвором IGBT, задает порог ограничения напряжения и в случае превышения  $V_{CE}$  этого порога стабилитроны переходят в проводящее состояние, транзистор открывается и переходит в линейное состояние, принимая на себя энергию перенапряжения.

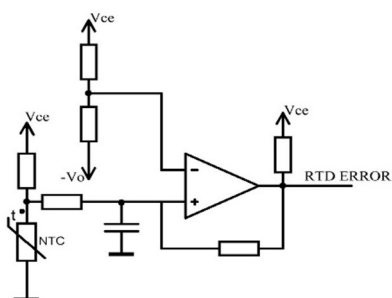


Рисунок 16 – Схема контроля температуры NTC модуля

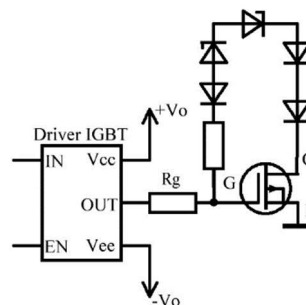


Рисунок 17 – Active clamping

### Подавление эффекта Миллера

Высокое значение  $dU/dt$  приводит к возникновению тока в цепи затвора. Этот ток будет протекать через емкость Миллера (рисунок 18), расположенную между коллектором и затвором транзистора [7]. Данный эффект способен вызвать ложное открывание IGBT и появление сквозного тока через оба транзистора полумоста. Современные микросхемы драйверов имеют функцию активного подавления эффекта Миллера. На рисунке 19 приведено схемное решение подавления эффекта Миллера (Miller Clamp).

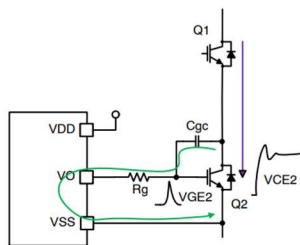


Рисунок 18 – Ложное отпирание IGBT из-за емкости Миллера

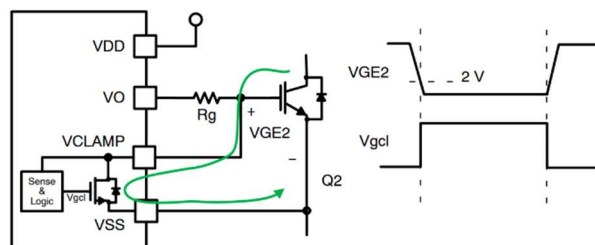


Рисунок 19 – Активное подавление эффекта Миллера

Функция подавления эффекта Миллера может быть реализована отдельно в драйвере или может быть встроена в интегральную микросхему драйвера. Для обхода тока Миллера встроены переключатель MOSFET. Когда напряжение на затворе снижается до 2 В, напряжение  $V_{gcl}$  повышается, MOSFET открывается и включается функция активного ограничения Миллера в момент отключения IGBT. Типичный ток  $I_{CLAMP}$  составляет 1,1 А при напряжении  $V_{CLAMP}$  2,5 В; таким образом, напряжение на затворе IGBT оказывается ниже напряжения включения IGBT. В момент включения IGBT  $V_{gcl}$  падает и функция активного ограничения Миллера отключается.

### D

**time и interlock** – Временная задержка после сигнала закрытия одного транзистора и перед сигналом открытия другого транзистора для исключения наложения открытых состояний ключей полумоста при переключении. Если задержка  $dead\ time$  отсутствует, то возможно протекание сквозного тока при переключении, возникает короткое замыкание и выход из строя транзистора. На рисунке 20 изображена диаграмма работы драйвера в режиме полумост (half-bridge) с наличием временной задержки  $t_{idt}$  и функцией блокировки одновременного включения  $interlock$ . Современные микросхемы драйверов имеют встроенную задержку  $dead\ time$  и функцию  $interlock$ . В случае если драйвер не имеет этих защит, то они реализуются на логических микросхемах или же контроллере, формирующем сигнал управления для драйвера, где программно можно менять значение задержки под определенный тип транзистора. Чтобы определить величину  $deadtime$  необходимо оценить временные характеристики включения и выключения транзисторов.

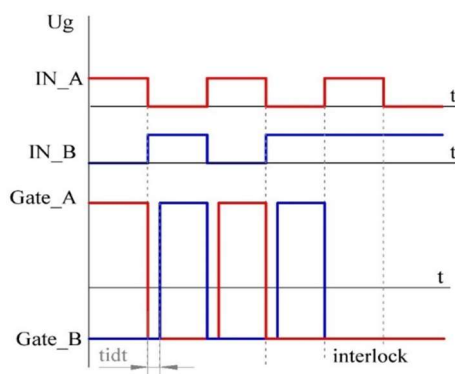


Рисунок 20 – Диаграмма работы драйвера в режиме полумост (half-bridge)

## Короткие импульсы

Для защиты от ложных переключений драйвера используется схема подавления коротких импульсных помех [8]. На рисунках 21, 22 приведен принцип подавления коротких импульсов. Управляющий ШИМ сигнал с оптического приемника попадает на каскад управления затвором не сразу, а пройдя через времязадающий RC фильтр и триггер Шмитта. Таким образом блокируются управляющие импульсы длительностью ниже заданного.

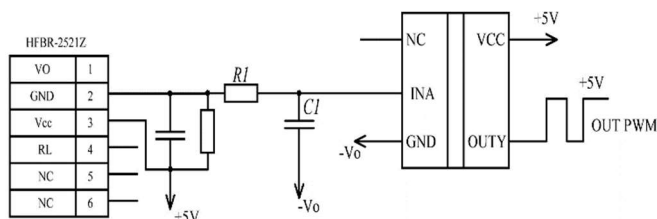


Рисунок 21 – Схема блокировки коротких импульсов

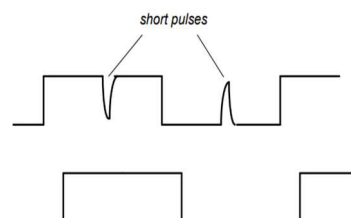


Рисунок 22 – Диаграмма блокировки коротких импульсов

Минимальное время подавления импульсов  $T$  рассчитывается по формуле:

Г  
д  $U$   
е – логический уровень включения по входам,  
– сопротивление резистора RC цепи,  
У емкостная характеристика цепи питания

5. Варианты реализации схем питания  
– верхний преобразовательный прибор, требуется отрицательное и положительное напряжение относительно эмиттера [9]. На рисунках 23, 24 представлен DC/DC - преобразователь способный формировать положительное и отрицательное напряжения. В драйверах где требуется высокая изоляция используют схему «раскачки» с использованием импульсного трансформатора (рисунок 25, 26). Помимо этого в высоковольтных преобразователях могут быть использованы драйверы с питанием по «токовой петле» (рисунок 27).

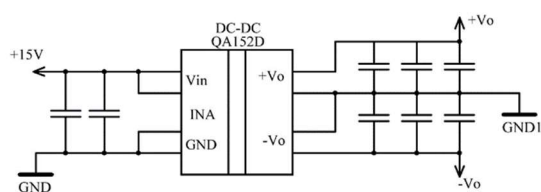


Рисунок 23 – Схема питания драйвера на примере DC/DC QA152D

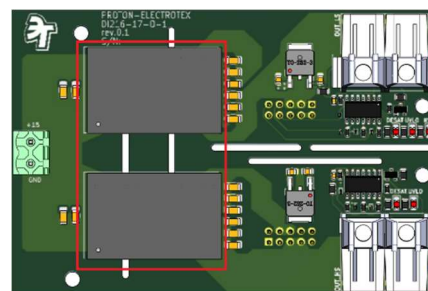


Рисунок 24 – Драйвер с питанием

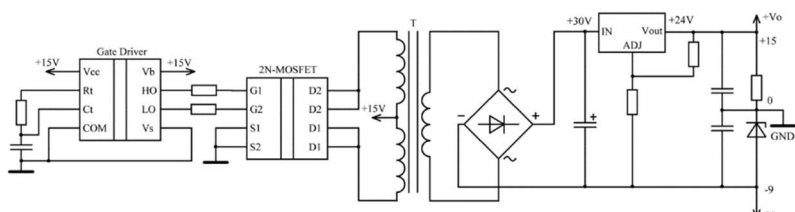


Рисунок 25 – Схема питания с применением схемы «раскачки» и трансформатора

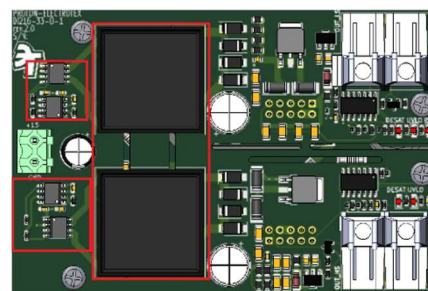


Рисунок 26 – Драйвер с применением схемы «раскачки» и импульсным трансформатором



Рисунок 27 – Питание драйвера по «токовой петле»

## 6 Варианты реализации интерфейса I/O

Для передачи управляющего сигнала и в драйвере могут использоваться как электрический интерфейс, так и оптический. Как правило электрические интерфейсы применяются в низковольтных драйверах, поскольку не обеспечивают гальванической развязки, и помимо управляющего сигнала через них подается питание на драйвер. В высоковольтных драйверах питание драйвера осуществляется через отдельный разъем, а сигналы управления и обратной связи передаются через оптические разъемы.

### Оптическая и гальваническая изоляция

Для обеспечения изоляции между первичными цепями управления и вторичными силовыми цепями в драйверах применяются изолированные микросхемы драйверов (рисунок 28). Для питания используют источники DC-DC с гальванической развязкой, на платах делают пропилы для создания воздушного изоляционного барьера между каналами управления и первичной и вторичной стороной для избежания пробоя изоляции по поверхности платы. Для передачи управляющего сигнала и сигнала обратной связи используют оптические приемники и передатчики (рисунок 29). Если конструктивно драйвер разделен на несколько плат (первичная и вторичная стороны), то платы располагают на расстоянии позволяющем избежать пробоя по воздуху.

Пример пробоя изоляции между первичной и вторичной стороной приведен на рисунке 30. Пробой изоляции произошел поскольку расстояние между платами не обеспечило требуемое напряжение изоляции.

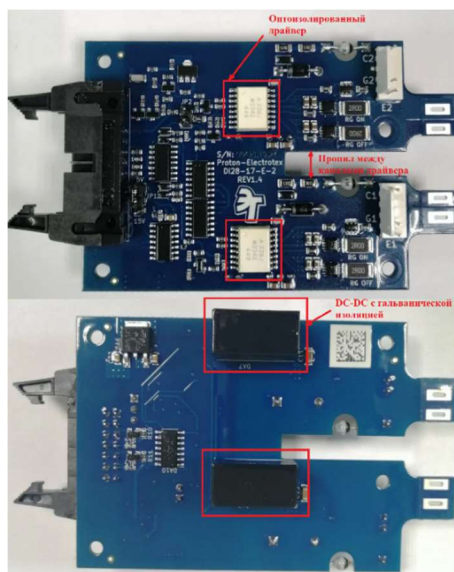


Рисунок 28 – Обеспечение гальванической развязки драйвера IGBT DI28-17-E-2 с применением оптоизолированного драйвера ACPL-339J, DC-DC с гальванической развязкой и пропилов между первичной и вторичной сторонами

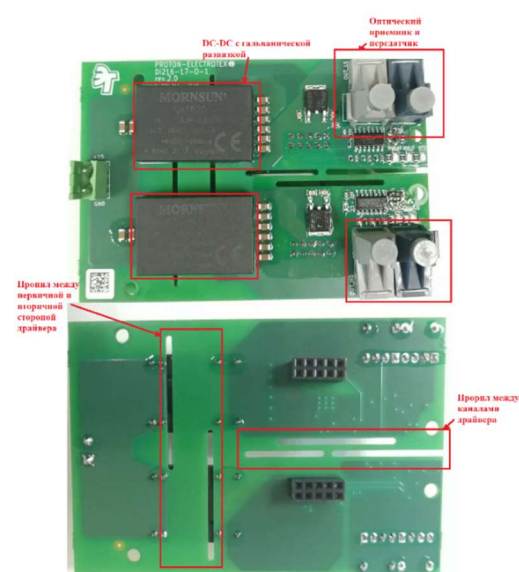


Рисунок 29 – Обеспечение гальванической развязки драйвера IGBT DI216-17-O-1 с применением оптических приемников и передатчиков семейства DC с гальванической развязкой и пропилов между каналами



Рисунок 30 – Пробой изоляции на напряжении 7,2 кВ AC

## 7 Варианты реализации логической и силовой части

### Логическая часть

Существует несколько вариантов обеспечения защитных функций в драйверах. Первый вариант является самым дешевым вариантом является использование простых микросхем логики, компараторов, транзисторов, резисторов, конденсаторов и и т.д. Недостатками такого подхода является: усложнение схемы, огромное количество корпусов на плате, нет возможности адаптировать схему под конкретную задачу, не самая высокая надежность. Вторым вариантом является использование специализированных микросхем. Данный вариант позволяет существенно упростить схему драйвера и уменьшить число корпусов на плате и повысить надежность работы устройства. Третий вариант, с применением программируемых логических интегральных микросхем и контроллеров является самым универсальным. Путем программной настройки можно формировать временные задержки, наличие таймера позволит отказаться от применения RC цепей. С их помощью можно организовать выбор между двумя режимами управления (независимый или полумост), формировать «мёртвое время», возможна блокировка сигналов при аварийных ситуациях.

### Силовая часть

Для реализации силовой части управления затвором существует несколько схемотехнических решений реализации управления затвором. 1) Использование каскада с отдельными цепями включения и выключения (рисунок 31). Преимуществами такого подхода является возможность регулировки выходного тока за счет изменения транзисторов. К недостаткам можно отнести подбор идентичных по параметрам N и P транзисторов и выборе подходящего драйвера для их управления. 2) Использование микросхемы драйвера, способной формировать выходной ШИМ +15/-9 В (рисунок 32) Преимуществом такого подхода является упрощение схемы и возможность формирования сигнала включения и выключения IGBT без применения транзисторов. Недостатком является фиксированный выходной ток драйвера и отсутствие аналогов.

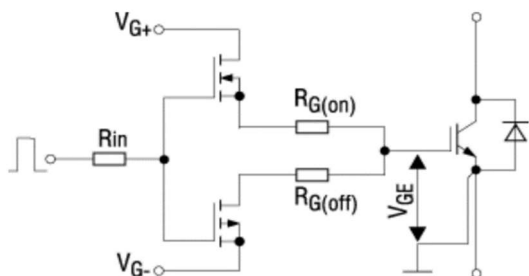


Рисунок 31 – Использование каскада с отдельными цепями включения и выключения.

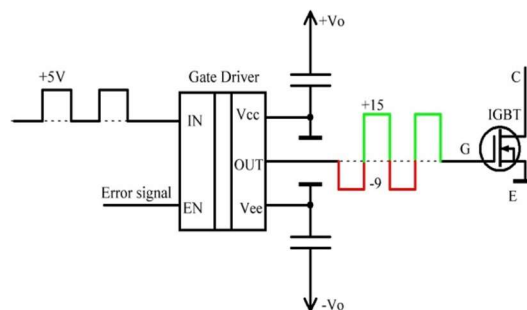


Рисунок 32 – Использование драйвера IGBT.

## 8 Драйверы управления единичными ключами IGBT

Для управления единичным ключом IGBT может быть использованы интегральные микросхемы драйвера, индивидуальный драйвер, и ядро драйвера с использованием платы –

адаптера.

### **Интегральная микросхема (Driver IC)**

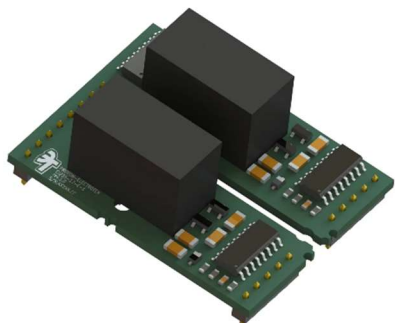
Содержит в себе логику управления и изоляционный барьер. В случае отсутствия изоляции применяется внешняя схема обеспечения изоляции и изолированный источник питания. Подходит для управления низковольтными ключами в маломощных системах.

### **Ядро (Driver Core)**

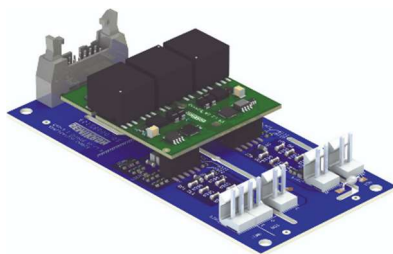
Компактное устройство, способное выполнять функции управления и защитные силового ключа. Ядро содержит источник питания DC-DC и логическую схему управления и защиты (рисунок 33). Гальваническая изоляция обеспечивается разделением каналов изоляционным барьером, применение оптронов и импульсных трансформаторов или DC-DC. Самостоятельно использоваться ядро не может. Для установки на модуль ему необходима плата - адаптер, которая устанавливается на модуль IGBT (рисунок 34). Применение ядра в связке с платой - адаптером позволяет настраивать пороги срабатывания защит и изменение затворных резисторов на плате - адаптера [11]. Ядро является универсальной схемой, изменениям подвергается только плата - адаптер под конкретное применение. Такой подход позволяет использовать ядро для управления не только одиночными транзисторами, но и транзисторами, соединенными параллельно.

### **Индивидуальный драйвер**

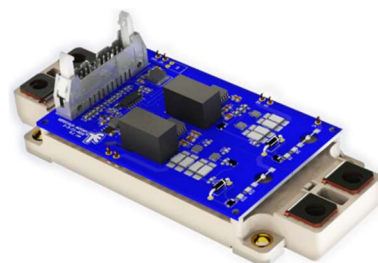
Плата драйвера является готовым устройством и выполняет все функции управления и защиты (рисунок 35). Отличается от ядра тем, что для подключения к модулю ему не требуется плата - адаптер. Драйверы могут устанавливаться на модуль методом пайки, прессовки, винтовым соединением или проводами. В отличие от ядра, схема управления и защиты индивидуального драйвера настроена под определенный тип модуля и конкретное применение. Поэтому нельзя его назвать универсальным устройством. Преимуществом индивидуального драйвера является возможность работать на больших напряжениях и обеспечивать большую изоляцию по сравнению с ядром.



*Рисунок 33 – Ядро драйвера*



*Рисунок 34 – Ядро драйвера, установленное на плату - адаптер*



*Рисунок 35 – Индивидуальный драйвер*

## **9 Драйвер для управления параллельно соединенными ключами**

Параллельное соединение силовых ключей IGBT выполняют с целью наращивания мощности электронных преобразователей [12]. При таком соединении важно контролировать состояния каждого IGBT, поскольку выход из строя хотя бы одного приведет к выходу всех оставшихся. Задачей параллельного драйвера является синхронизация переключений транзисторов. В управлении параллельными ключами существует два подхода: 1) Использование индивидуального драйвера на каждом ключе; 2) Использование принципа «ведущий-ведомый» (Master-Slave), где Master – центральный драйвер управления на котором размещается оптический интерфейс входа/выхода, схема питания, управления и монитора ошибок, Slave – ведомый драйвер, представляет собой плату на которой размещаются резисторы затворов  $R_G$  (раздельные для режимов включения и выключения), эмиттерные сопротивления  $R_E$  и диоды-супрессоры. Slave-драйверы подсоединяются к Master с помощью проводов (рисунок 36), по которым передаются общие команды и напряжения источника питания на вторичной стороне.

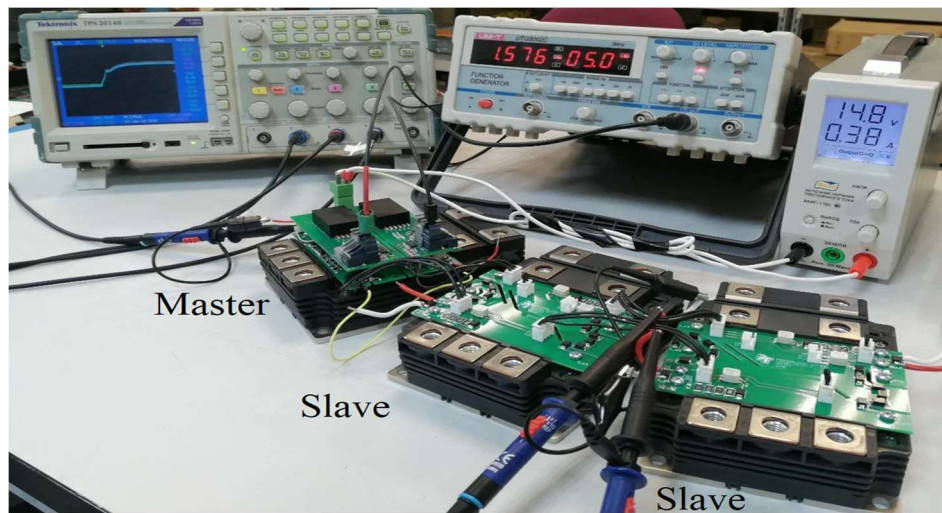


Рисунок 36 – Соединение Master – Slave на модулях MIXM-HB12FA-1200N AISiC

Поскольку модули располагаются на разном расстоянии от драйвера, то возможно асинхронное переключение модулей (рисунок 37, 38), чтобы избежать этого рекомендуется использовать общую линию управления затвором. Сигнал управления сначала попадает на самый удаленный модуль, а затем возвращается к самому ближайшему. Осциллограмма синхронного переключения модулей с помощью компенсации длины управления приведена на рисунке 39, 40.

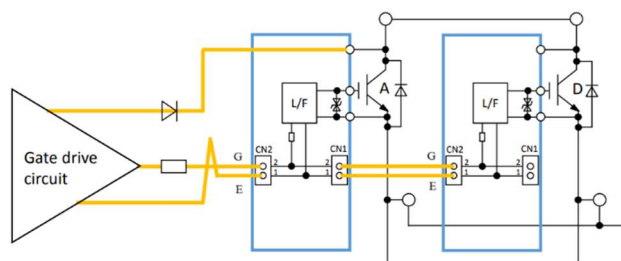


Рисунок 37 – Отсутствие компенсации длины пути управляющего сигнала затвора

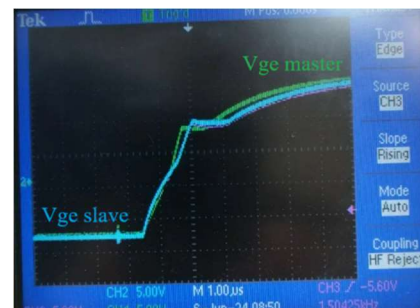


Рисунок 38 – Асинхронное переключение параллельных модулей

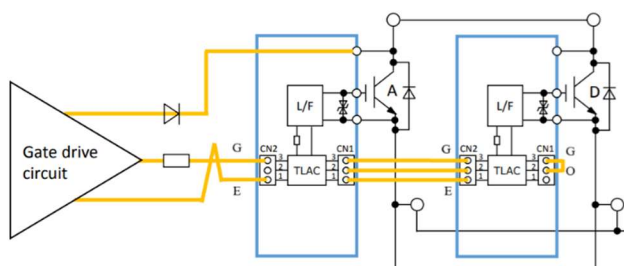


Рисунок 39 – Компенсация длины пути управляющего сигнала затвора



Рисунок 40 – Синхронное переключение параллельных модулей

Чтобы минимизировать разницу моментов включения обязательно использовать индивидуальные одинаковые затворные резисторы на каждом модуле. Для балансировки токов, в сигнальных цепях эмиттеров устанавливают резисторы  $R_E$ , номиналом от 0,5...1 Ом. Выбирая концепцию управления, следует исходить из мощности системы. При компактных маломощных системах следует выбирать концепцию Master-Slave. Негативное влияние на распределение токов, различное время прохождения сигналов, а также разницы напряжений

«затвор-эмиттер» оказывается несущественным. Кроме того, проявляется положительный эффект обратной связи по эмиттерным цепям. В более мощных системах соединения эмиттеров становятся более длинными и несимметричными, в результате чего обратная связь по эмиттеру приводит к возникновению паразитных колебаний между параллельными модулями. Для исключения этого следует объединять параллельные ключи в группы или использовать концепцию «индивидуальных» драйверов.

### 10 Определение совместимости драйвера с IGBT ключом

Для управления IGBT необходима придерживаться принципов, которые позволят избежать преждевременного выхода из строя силового ключа.

- Быстрое нарастание и спад импульсов управления для избежание тепловых потерь при переключении;
- Высокий ток управления для обеспечения быстрого перезаряда входных емкостей транзистора;
- Совместимость с цифровыми сигналами ТТЛ/КМОП.

Чтобы драйвера был совместим с силовым ключом IGBT, необходимо чтобы его параметры были совместимы с параметрами ключа и режимами его работы. Приведем рекомендуемые параметры работы драйвера для IGBT:

- Напряжение затвор-эмиттер  $U_{GE}$  для включения транзистора IGBT с минимальными потерями должно быть +15;
- Напряжение затвор-эмиттер  $U_{GE}$  для выключения транзистора IGBT с минимальными потерями должно быть от минус 7 до минус 15;
- Максимальное напряжение затвор-эмиттер не должно превышать  $\pm 20$  В;
- Выходной ток драйвера должна соответствовать заряду затвора  $Q_G$  модуля
- Внутреннее сопротивление драйвера управления должно выбираться в пределах допустимых значений указанных для конкретного модуля с учетом минимальных динамических потерь и исключающих возникновение перенапряжений вызванных перезарядкой индуктивностей;
- Длина цепи управления должна быть минимальна;
- Рекомендуется использовать витую пару или применять прямой монтаж платы драйвера на выводы управления модуля.

### Заключение

В данной статье рассмотрена архитектура современного драйвера IGBT. Драйвер – устройство, которое способно не только управлять затвором силового транзистора, но и выполнять защитные функции. Без драйвера не может обойтись ни один преобразователь и зачастую разработчикам таких преобразователей приходится использовать не готовые драйверы, а разрабатывать собственный, в зависимости от типа ключей, требуемых защит и т.д. В статье рассмотрены назначения защит и способы их реализации. В случае необходимости параллельного соединения транзисторов IGBT, возникает необходимость использовать параллельного драйвера, способного обеспечить питание и защиту всех соединенных ключей. Мы рассмотрели принципы построения такого драйвера и определили ключевые моменты, влияющие на синхронное управление ключами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хермвиль М. Управление изолированным затвором IGBT / М. Хермвиль, А. Колпаков // Электронные компоненты. – 2008. – №6. – С. 43–50.
2. Арендт В. Управление изолированными затворами MOSFET/IGBT, базовые принципы и основные схемы / В. Арендт, Н. Ульрих, Р. Тобиас и др. // Силовая электроника. – 2013. – №5 (44). – С. 50–58.
3. Новиков П. Затворный резистор / Новиков П. // Силовая электроника. – 2018. – №6. – С. 4–8.
4. Крапп Й. Защитные функции современных драйверов IGBT // Силовая электроника. 2010. № 5. – С. 41–44.
5. Колпаков А. Характеристики и особенности применения драйверов MOSFET и IGBT // Компоненты и технологии 2003. № 3.
6. Инго Р. Управление изолированным затвором IGBT / Инго Р, Ульрих Н, А. Колпаков // Силовая

электроника. – 2019. – №3. – С. 33–43.

7. Гери О. Подавление эффекта Миллера в схемах управления Mosfet/IGBT // Силовая электроника. 2007. № 4. – С. 28–29.

8. Бербенец А. Особенности разработки IGBT-драйверов на основе ядра SCALE-2 // Силовая электроника. 2011. № 5 – С. 47–52.

9. Алексеев В. Источники питания для драйверов MOSFET, IGBT и SiC производства Murata // Компоненты и технологии. 2016. № 2. – С. 14–20.

10. Новиков П. Гальваническая развязка в силовых преобразователях специального назначения / Новиков П. // Силовая электроника. – 2020. – №2. – С. 44–47.

11. Колпаков А. Цифровые драйверы и адаптеры нового поколения // Силовая электроника 2020. № 2. – С. 24–31.

12. Хофштоттер Н. Параллельная работа IGBT при различных методах управления затворами // Силовая электроника. 2017. № 3 – С. 12–23.

**Тарасов Ярослав Олегович**

АО «Протон – Электротекс», г. Орел

инженер-электроник

302030, г. Орел, Лескова, 19

Тел. +79103045065

E-mail: ya.tarasov@proton-electrotex.com

TARASOV Y.O.

## ARCHITECTURE OF THE MODERN DRIVER OF POWER IGBT KEYS

**Abstract.** *The article discusses the main parameters of IGBT drivers. The criteria for choosing a driver are given. The gate control schemes are considered. The main and extended protective functions and possible ways of their implementation are defined. Single drivers and drivers for parallel IGBT control are considered. The features of building a parallel driver are given.*

**Keywords:** *IGBT, driver, gate control, parallel switching of transistors, transistor protection.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Hermville M. Control of an isolated IGBT gate / M. Hermville, A. Kolpakov // Electronic components. - 2008. – No.6. – pp. 43-50.

2. Arendt V. Control of isolated MOSFET/IGBT gates, basic principles and basic circuits / V. Arendt, N. Ulrich, R. Tobias et al. // Power electronics. – 2013. – №5 (44). – Pp. 50-58.

3. Novikov P. Gate resistor / Novikov P. // Power electronics. - 2018. – No.6. – pp. 4-8.

4. Krapp J. Protective functions of modern IGBT drivers // Power electronics. 2010. No. 5. – pp. 41-44.

5. Kolpakov A. Characteristics and application features of MOSFET and IGBT drivers // Components and Technologies 2003. No. 3.

6. Ingo R. IGBT isolated gate control / Ingo R, Ulrich N., A. Kolpakov // Power electronics. - 2019. – No.3. – pp. 33-43.

7. Gehry O. Suppression of the Miller effect in Mosfet control circuits/IGBT// Power electronics. 2007. No. 4. – pp. 28-29.

8. Berbenets A. Features of the development of IGBT drivers based on the SCALE-2 core // Power Electronics. 2011. No. 5 – pp. 47-52.

9. Alekseev V. Power supplies for MOSFET, IGBT and SiC drivers manufactured by Murata // Components and Technologies. 2016. No. 2. – pp. 14-20.

10. Novikov P. Galvanic isolation in special-purpose power converters / Novikov P. // Power electronics. – 2020. – No.2. – pp. 44-47.

11. Kolpakov A. Digital drivers and adapters of a new generation // Power electronics 2020. No. 2. – pp. 24-31.

12. Hofstotter N. Parallel operation of IGBT with various methods of gate control // Power electronics. 2017. No. 3 – pp. 12-23.

**Tarasov Yaroslav Olegovich**

JSC «Proton – Electrotex», Orel

an electronics engineer

302030, Orel, Leskova, 19

Phone: +79103045065

E-mail: ya.tarasov@proton-electrotex.com

© Тарасов Я.О., 2025

МАТЮХИН С.И., МУРКО А.С., ВАСЯЕВ А.А., ТИТУШКИН Д.А.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИЛОВОГО P-I-N ДИОДА ОТ СИЛЫ ПРЯМОГО ТОКА И СКОРОСТИ ЕГО СПАДА В ЦЕПИ С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

**Аннотация.** Методами компьютерного моделирования технологических процессов создан цифровой двойник высоковольтного низкочастотного p-i-n-диода D053-7100, выпускаемого АО «Протон-Электротекс» (г. Орёл, Россия). Путём имитационного моделирования этого диода изучена зависимость его параметров обратного восстановления от силы прямого тока и скорости его спада в цепи с индуктивной нагрузкой.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, высоковольтный p-i-n-диод, имитационное моделирование, обратное восстановление.

### Введение

Высоковольтные p-i-n-диоды являются одним из наиболее популярных видов силовых полупроводниковых приборов (СПП) и широко используются в различного рода выпрямителях, коммутаторах и преобразователях электрического тока. При этом, несмотря на длительную историю изучения и совершенствования характеристик этих приборов, в их теории в настоящее время остается ряд нерешенных вопросов, примером которых является вопрос о зависимости коммутационных параметров p-i-n-диодов от силы и скорости спада прямого тока при переключении диодов с прямого направления на обратное прямоугольным импульсом обратного напряжения в электрической цепи с индуктивной нагрузкой [1–3].

Как известно [2–7], при этих условиях p-i-n-диоды переходят в закрытое (непроводящее) состояние за конечное время  $t_{rr}$ , необходимое для удаления избыточного заряда  $Q_{rr}$ , накопленного при работе прибора в проводящем состоянии (рисунок 1). При этом переходный процесс переключения диодов с прямого направления на обратное состоит из следующих основных этапов: 1) этапа спада прямого тока от начального значения  $I_{FM}$  до нуля из-за смены полярности ЭДС источника; 2) этапа нарастания обратного тока до максимального значения  $I_{RM}$  длительностью  $t_s$ ; 3) этапа восстановления обратного сопротивления диода и падения обратного тока до нуля длительностью  $t_f$ .

Чем меньше время  $t_{rr} = t_s + t_f$ , тем быстрее диоды переключаются с прямого направления на обратное и тем более высокочастотные сигналы они способны обрабатывать [1]. В то же время приборы с одинаковым  $t_{rr}$  могут иметь разные значения  $t_s$  и  $t_f$ , поэтому для характеристики процесса переключения вводится ещё один параметр – так называемый фактор мягкости диода  $s$ , или  $s$ -фактор:

$$s = \frac{t_f}{t_s}. \quad (1)$$

В настоящей работе методами компьютерного моделирования соответствующих технологических процессов создан цифровой двойник высоковольтного низкочастотного p-i-n-диода D053-7100, выпускаемого АО «Протон-Электротекс» (г. Орёл, Россия), и путём имитационного моделирования работы этого полупроводникового прибора изучена зависимость его коммутационных параметров  $Q_{rr}$ ,  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$ ,  $t_s$ ,  $t_f$  и  $s$  от силы прямого тока  $I_{FM}$  и скорости его спада  $di/dt$  перед переключением.

**Методика моделирования. Сравнение результатов моделирования с результатами измерений**

Полученное путём технологического моделирования распределение примесей в полупроводниковой структуре диода D053-7100 изображено на рисунке 2. На рисунке 3 представлено сравнение результатов моделирования ВАХ этого диода и результатов

экспериментальных измерений. Для получения зависимостей коммутационных параметров диода от силы и скорости спада прямого тока проводилось приборное моделирование диода в электрической цепи, изображенной на рисунке 4.

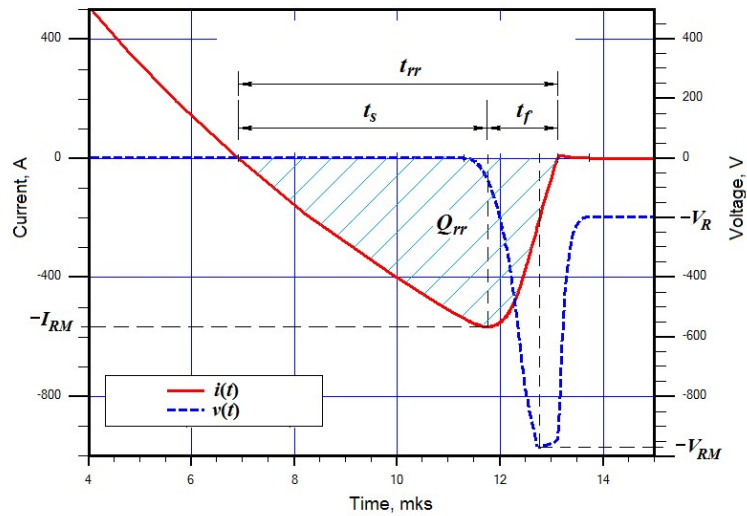


Рисунок 1 – Зависимости от времени тока через диод  $i(t)$  и напряжения на диоде  $v(t)$  при его переключении с прямого направления на обратное в цепи с индуктивной нагрузкой

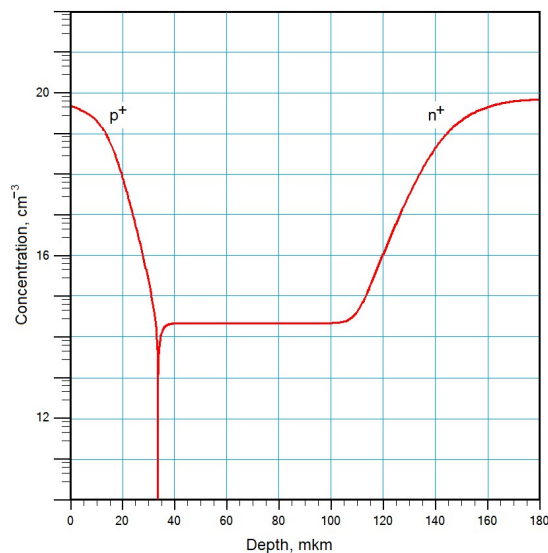


Рисунок 2 – Распределение примесных атомов в полупроводниковой структуре диода D053-7100

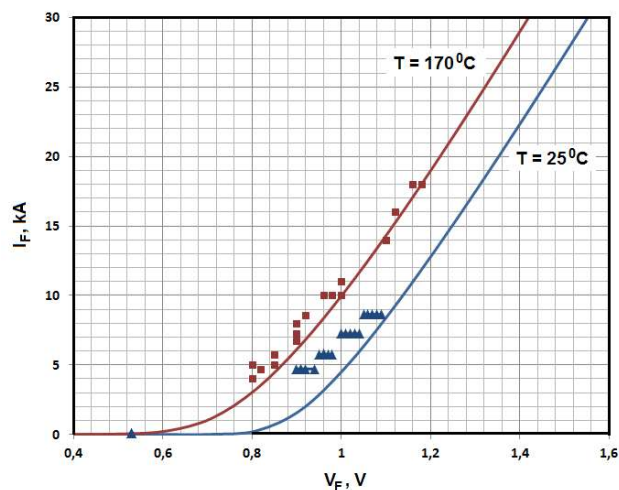


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики диода D053-7100: сплошные кривые – результаты моделирования, маркеры – результаты измерений

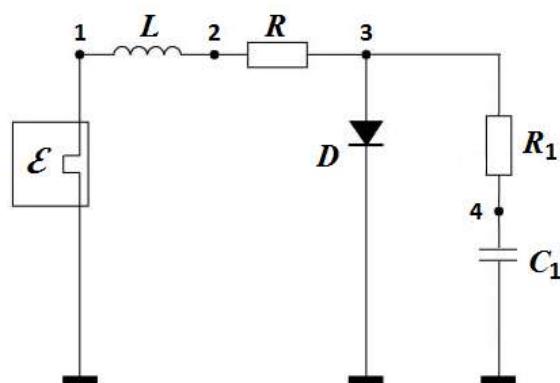


Рисунок 4 – Электрическая цепь для моделирования процесса обратного восстановления силового диода D053-7100

На этом рисунке  $\varepsilon$  – это импульсный источник напряжения;  $L$  – индуктивность;  $R$  – токоформирующий резистор;  $D$  – испытуемый диод;  $R_1$ ,  $C_1$  – сопротивление и ёмкость снабберной цепи. В настоящей работе были выбраны значения  $R_1 = 10$  Ом и  $C_1 = 10$  мкФ.

В момент времени  $t = 0$  напряжение источника  $\varepsilon = +200$  В меняло полярность, так что обратное напряжение на диоде становилось равным  $V_R = 200$  В. Величина прямого тока  $I_{FM}$ , протекающего через диод до смены полярности, задавалась сопротивлением  $R$ :

$$I_{FM} \approx \varepsilon / R, \quad (2)$$

а скорость спада этого тока после смены полярности – индуктивностью  $L$ :

$$di/dt \approx V_R / L. \quad (3)$$

В результате моделирования обратного восстановления диода для разных значений  $I_{FM}$  и  $di/dt$  были получены кривые обратного восстановления типа тех, что изображены на рисунке 1. Путем компьютерной обработки этих кривых для каждого значения  $I_{FM}$  и  $di/dt$  определялись коммутационные параметры диода  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$ ,  $t_s$ ,  $t_f$ ,  $s$  и  $Q_{rr}$ . Величина заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  определялась путем численного интегрирования обратного тока  $i(t)$  по времени (рисунок 1). Значение  $s$ -фактора вычислялось по формуле (1).

Сравнение некоторых из полученных таким образом результатов с результатами экспериментальных измерений представлено на рисунке 5. Как показывает этот рисунок, результаты моделирования демонстрируют удовлетворительное согласие с измерениями.

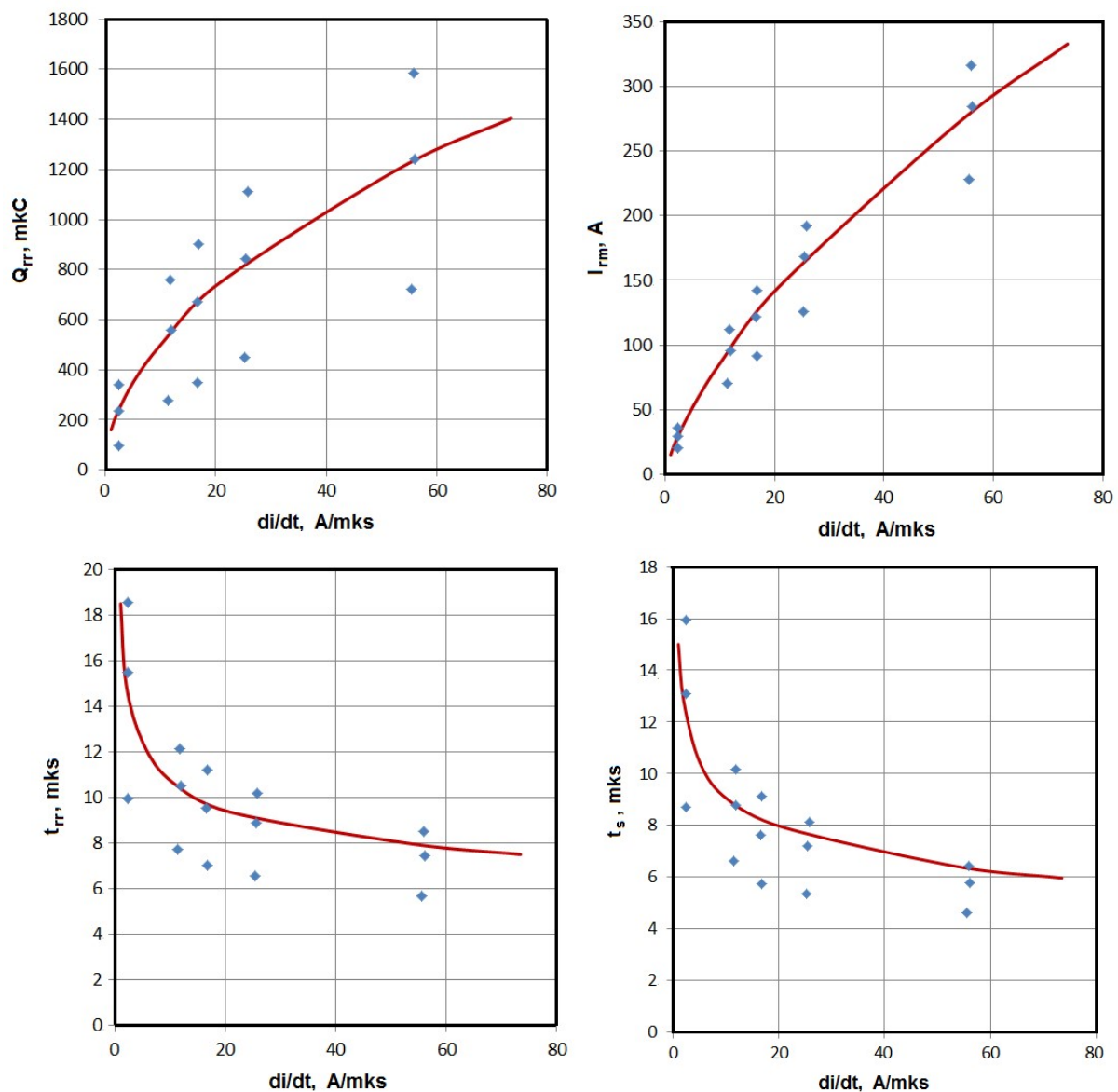
### Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования коммутационных параметров  $Q_{rr}$ ,  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$ ,  $t_s$ ,  $t_f$  и  $s$  в зависимости от силы прямого тока  $I_{FM}$  и скорости его спада  $di/dt$  представлены на рисунках 6 – 7.

Как видно из рисунка 6, при достаточно больших значениях прямого тока (500 – 2000 А) и умеренных скоростях спада тока (до 200 А/мкс) зависимости  $Q_{rr}$ ,  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$  и  $t_s$  от  $di/dt$  являются степенными [5], однако показатели соответствующих степеней зависят от силы прямого тока [2]. При больших скоростях спада тока (свыше 200 А/мкс), а также при малых значениях прямого тока  $I_{FM}$  (до 500 А) степенные функции описывают эти зависимости хуже. В частности, при малых токах  $I_{FM}$  зависимости  $Q_{rr}$ ,  $I_{RM}$  и  $t_s$  от  $di/dt$  скорее логарифмические. Это может быть связано с тем, что форма импульсов обратного тока при малых токах и высоких скоростях его спада из-за нелинейных эффектов становится скорее «прямоугольной», чем «треугольной» (рисунок 8).

Этим же можно объяснить и аномальное поведение при малых токах зависимостей  $t_f(di/dt)$  и  $s(di/dt)$  (рисунки 6, 7). В области же больших токов эти зависимости являются немонотонными, но сами значения  $t_f$  и  $s$  слабо зависят от силы прямого тока  $I_{FM}$  и скорости

его спада  $di/dt$ . Так что при инженерных расчетах величины  $t_f$  и  $s$  в широком диапазоне токов и скоростей можно считать постоянными. В частности для диода D053-7100, для которого проводилось моделирование,  $t_f \approx 1,5$  мкс, а  $s \approx 0,25$ .



**Рисунок 5 – Зависимости коммутационных параметров  $Q_{rr}$ ,  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$  и  $t_s$  от скорости спада прямого тока, полученные при токе  $I_{FM} = 1$  кА и температуре  $T = 170$  °С:**  
сплошные кривые – результаты моделирования, маркеры – результаты измерений

Что касается зависимости от силы прямого тока коммутационных параметров  $Q_{rr}$ ,  $I_{RM}$ ,  $t_{rr}$  и  $t_s$ , то, как показывает рисунок 7, она является неоднозначной. Так, в случае  $Q_{rr}$  и  $I_{RM}$  в области небольших скоростей спада тока она является скорее степенной или даже линейной, а в случае  $t_{rr}$  и  $t_s$  – скорее логарифмической. Однако с ростом скорости спада тока зависимости  $Q_{rr}(di/dt)$  и  $I_{RM}(di/dt)$  довольно быстро становятся логарифмическими, а  $t_{rr}(di/dt)$  и  $t_s(di/dt)$  – степенными [2]. Вдобавок к этому в области очень больших скоростей  $di/dt$  функция  $t_s(di/dt)$  становится немонотонной.

### Заключение

Коммутационные параметры относятся к важнейшим характеристикам СПП, поскольку от них в значительной степени зависят динамические свойства и нагрузочная

способность приборов, КПД и условия их охлаждения. В связи с этим полученные в настоящей работе результаты оказываются полезными как с точки зрения проведения инженерных расчетов, так и с точки зрения разработки различного рода компактных математических моделей коммутационных параметров, которые можно было бы использовать в программах схемотехнического моделирования [8].

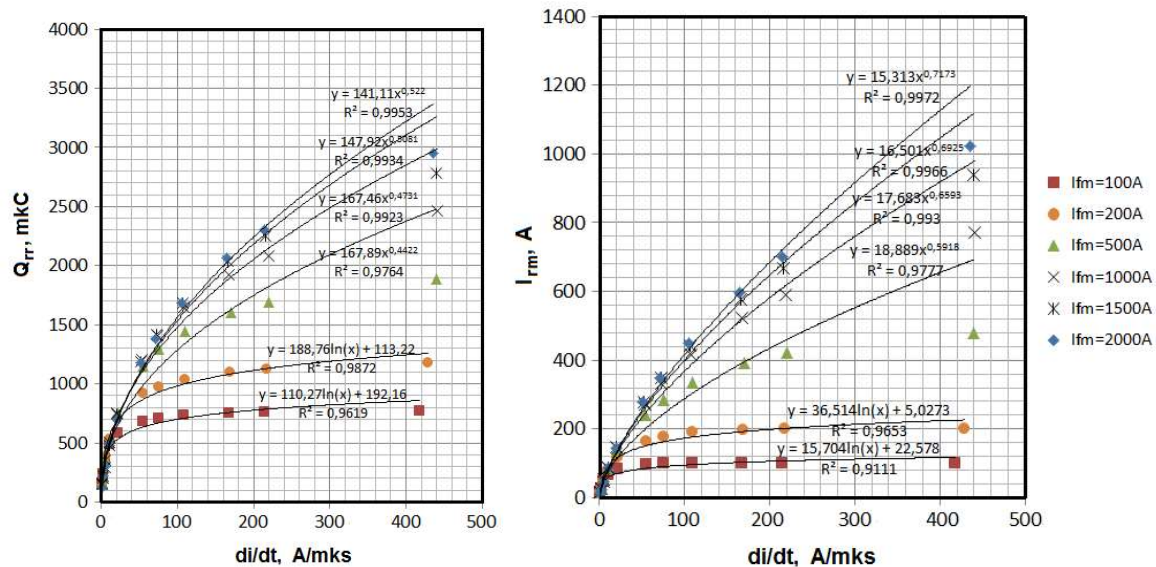


Рисунок 6.1 – Результаты моделирования коммутационных параметров  $Q_{rr}$  и  $I_{RM}$  в зависимости от скорости спада прямого тока при температуре  $T = 170^\circ\text{C}$  и разных значениях тока (маркеры)

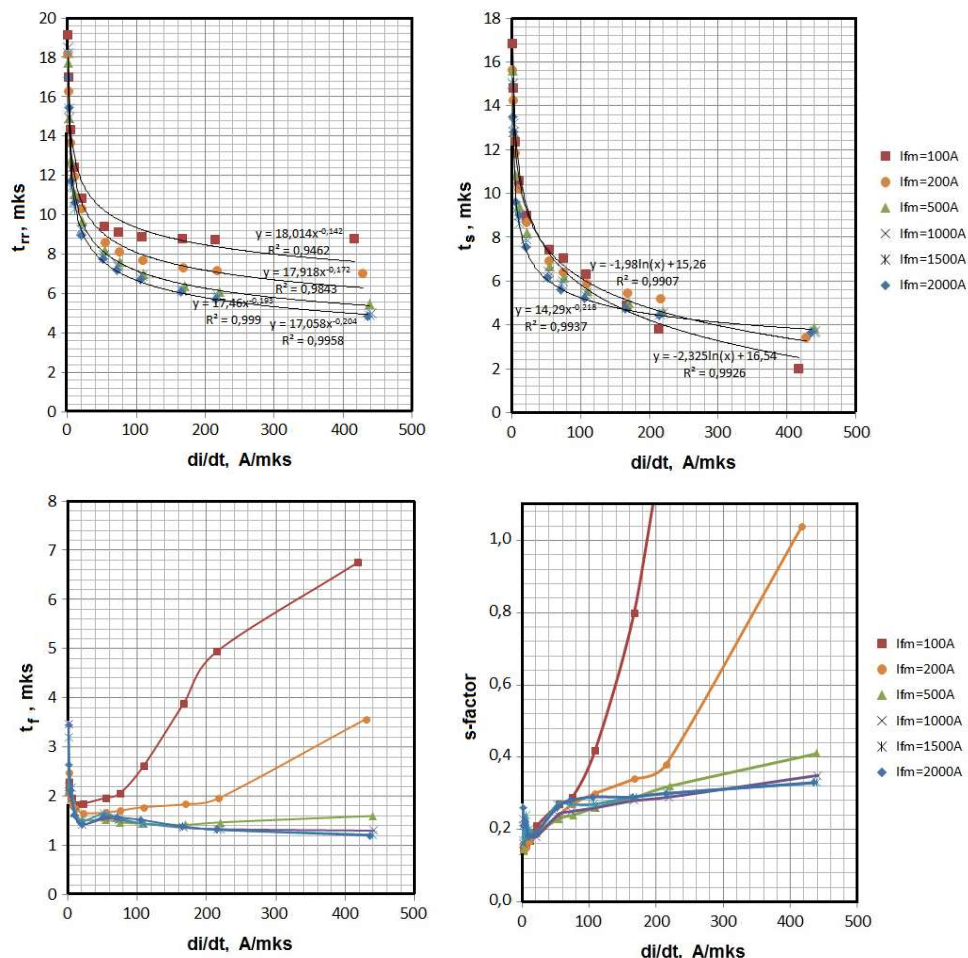


Рисунок 6.2 – Результаты моделирования коммутационных параметров  $t_{rr}$ ,  $t_s$ ,  $t_f$  и  $s$  в зависимости от скорости спада прямого тока при температуре  $T = 170^\circ\text{C}$  и разных значениях тока (маркеры)

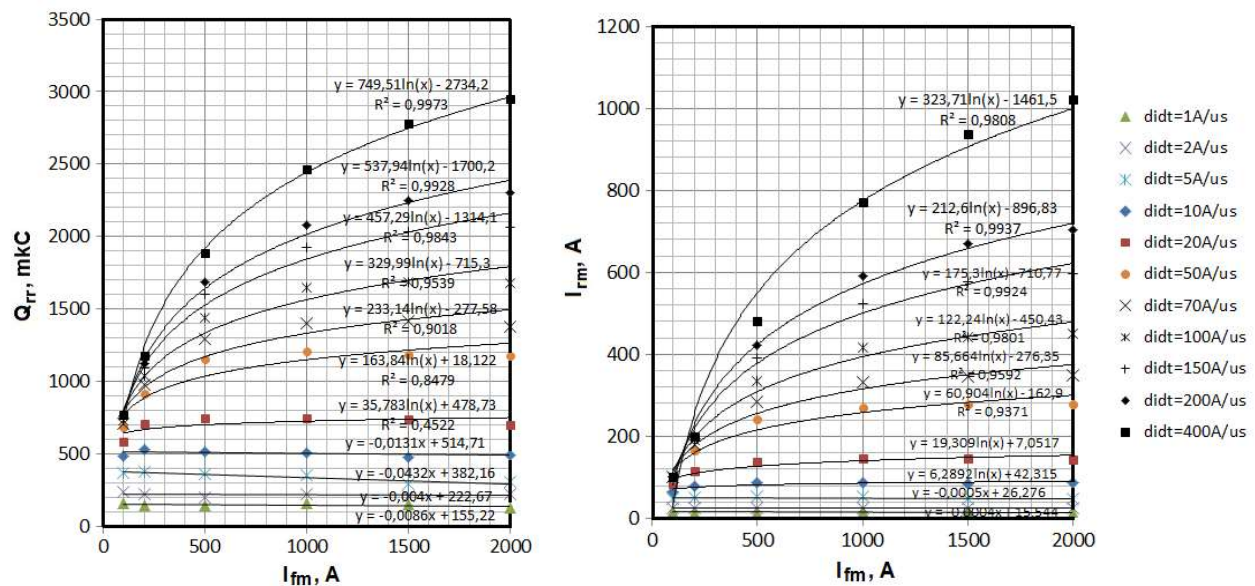


Рисунок 7.1 – Результаты моделирования коммутационных параметров  $Q_{rr}$  и  $I_{RM}$  в зависимости от силы прямого тока при температуре  $T = 170^\circ\text{C}$  и разных значениях скорости спада тока (маркеры)

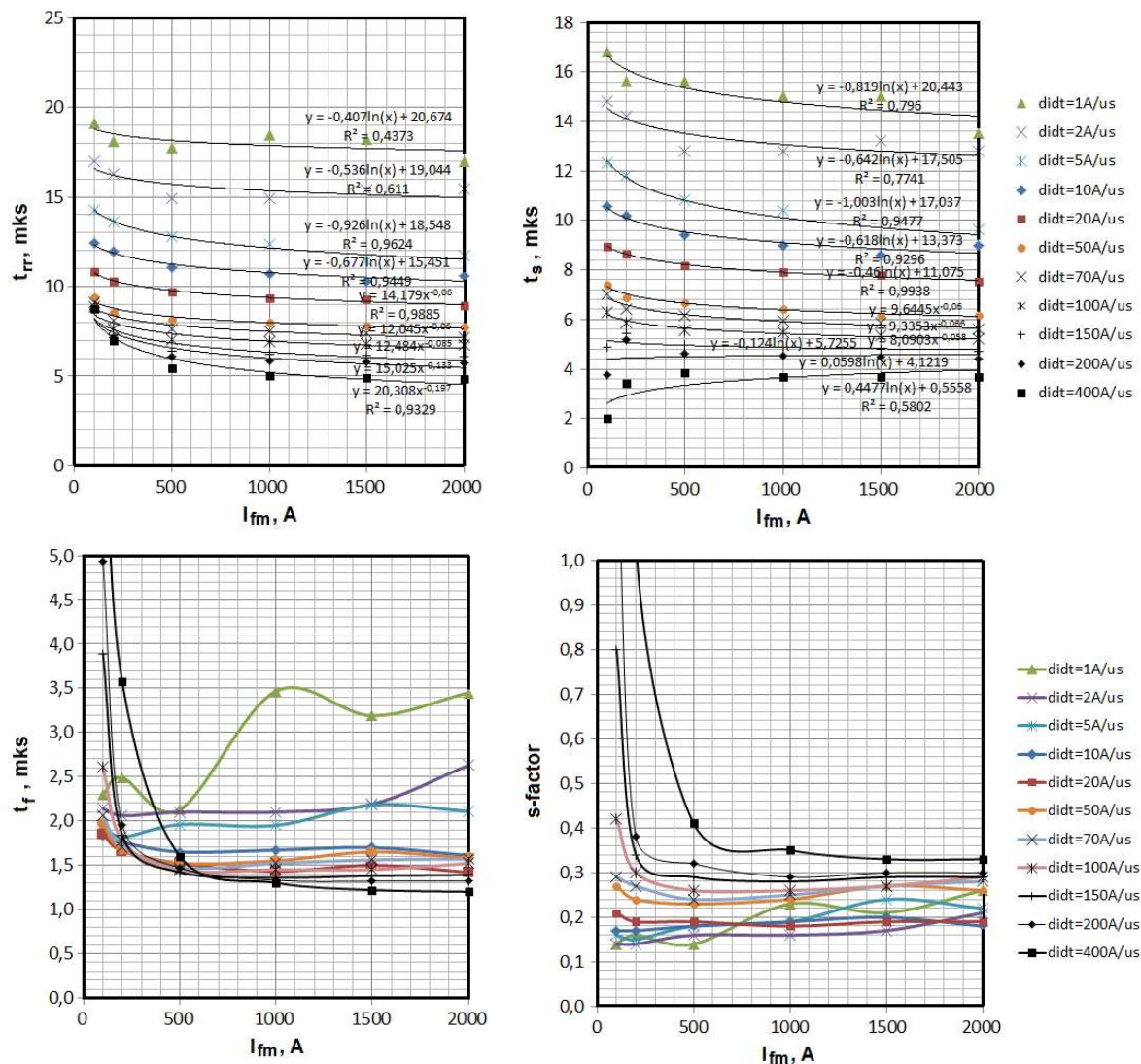
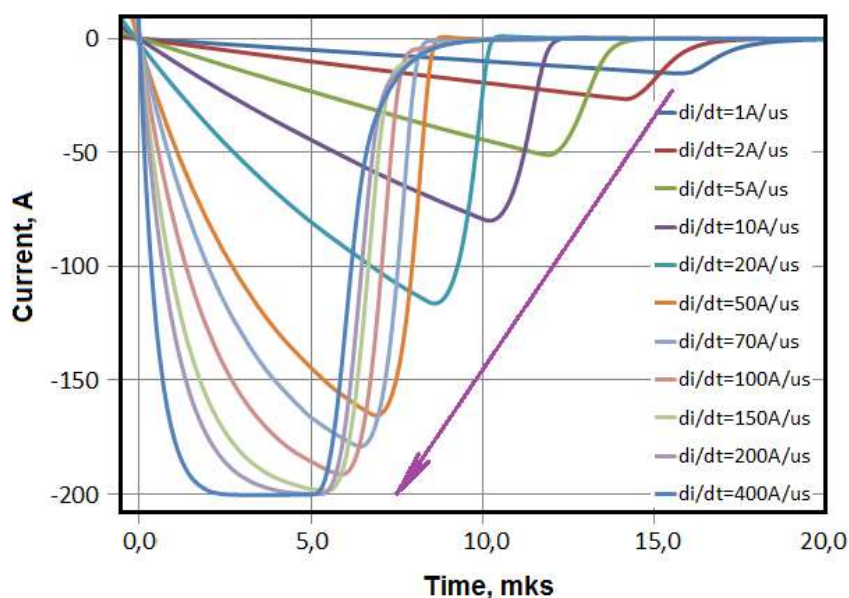


Рисунок 7.2 – Результаты моделирования коммутационных параметров  $t_{rr}$ ,  $t_s$ ,  $t_f$  и  $s$  в зависимости от силы прямого тока при температуре  $T = 170^\circ\text{C}$  и разных значениях скорости спада тока (маркеры)



**Рисунок 8 – Изменение формы импульса обратного тока при увеличении скорости спада прямого тока  $I_{FM} = 200$  А (температура  $T = 170$  °С).**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюхин С.И., Ставцев А.В. Моделирование частотных характеристик силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. – 2010. – №4. – С.34-40.
2. Матюхин С.И., Ставцев А.В. Коммутационные параметры силовых полупроводниковых приборов, характеризующие их переключение из проводящего в непроводящее состояние // Силовая электроника. – 2011. – №1. – С.14-16.
3. Матюхин С.И., Ставцев А.В., Писарев А.А., Малый Д.О., Титушкин Д.А. Зависимость коммутационных параметров высоковольтных р-и-п-диодов от силы и скорости изменения прямого тока при переключении диодов из проводящего состояния в непроводящее // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №5-2 (313). – С.169-179.
4. Евсеев Ю.А., Дерменжи П.Г. Силовые полупроводниковые приборы, - М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
5. Абрамович М.И., Бабайлов В.М., Либер В.Е. и др. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. - М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
6. Baliga J.B. Fundamentals of Power Semiconductor Devices, - N.Y.: Springer, 2010. – 1069 p.
7. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability, - Switzerland: Springer, 2018. – 536 p.
8. Матюхин С.И., Макулевский Г.Р., Деев О.В. Современное программное обеспечение для моделирования в электронике // Информационные системы и технологии. – 2014. – №2 (82). – С.58-71.

#### **Матюхин Сергей Иванович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доктор физико-математических наук, заведующий  
кафедрой технической физики и математики  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 41-98-02  
E-mail: sim1@mail.ru

#### **Васяев Андрей Аркадьевич**

АО «Протон-Электротекс», г. Орел  
Инженер-конструктор отдела разработок  
биполярных приборов прижимной конструкции  
302040, г. Орел, ул. Лескова, 19  
Тел. (4862) 44-04-11  
E-mail: a.vasyaev@proton-electrotex.com

#### **Мурко Александр Сергеевич**

АО «Протон-Электротекс», г. Орел  
Инженер-конструктор отдела разработок  
биполярных приборов прижимной конструкции  
302040, г. Орел, ул. Лескова, 19  
Тел. (4862) 44-04-11  
E-mail: a.murko@proton-electrotex.com

#### **Титушкин Дмитрий Александрович**

АО «Протон-Электротекс», г. Орел  
Ведущий инженер по новой технике отдела разработок  
биполярных приборов прижимной конструкции  
302040, г. Орел, ул. Лескова, 19  
Тел. (4862) 44-04-11  
E-mail: d.titushkin@proton-electrotex.com

MATYUKHIN S.I., MURKO A.S., VASYAEV A.A., TITUSHKIN D.A.

## DEPENDENCE OF THE REVERSE RECOVERY PARAMETERS OF A POWER P-I-N DIODE ON THE FORWARD CURRENT AND THE CURRENT DROP RATE IN THE CIRCUIT WITH INDUCTIVE LOAD

**Abstract.** *A digital twin of the high-voltage low-frequency p-i-n-diode D053-7100 produced by JSC Proton-Electrotex (Orel, Russia) has been created by methods of computer simulation of technological processes. Using simulation of the diode, the dependence of its reverse recovery parameters on the forward current and the current drop rate in the circuit with inductive load has been investigated.*

**Keywords:** *digital twin, high-voltage p-i-n diode, simulation, reverse recovery.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Matyukhin S.I., Stavtsev A.V. Modelirovanie chastotnykh kharakteristik silovykh poluprovodnikovyykh priborov // *Silovaya elektronika*. – 2010. – №4. – S.34-40.
2. Matyukhin S.I., Stavtsev A.V. Kommutatsionnye parametry silovykh poluprovodnikovyykh priborov, kharakterizuyushchie ih pereklyuchenie iz provodyashchego v neprovodyashchee sostoyanie // *Silovaya elektronika*. – 2011. – №1. – S.14-16.
3. Matyukhin S.I., Stavtsev A.V., Pisarev A.A., Malyi D.O., Titushkin D.A. Zavisimost kommutatsionnykh parametrov vysokovoltnykh p-i-n-diodov ot sily i skorosti izmeneniya pryamogo toka pri pereklyuchenii diodov iz provodyashchego sostoyaniya v neprovodyashchee // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. – 2015. – №5-2 (313). – S.169-179.
4. Evseev Yu.A., Dermenzi P.G. *Silovye poluprovodnikovye pribory*, - M.: Energoizdat, 1981. – 472 s.
5. Abramovich M.I., Babajlov V.M., Liber V.E. i dr. *Diody i tiristory v preobrazovatelnykh ustanovkakh*. - M.: Energoatomizdat, 1992. – 432 s.
6. Baliga J.B. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*, - N.Y.: Springer, 2010. 1069 p.
7. Lutz J., Schlengenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. *Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability*, - Switzerland: Springer, 2018. 536 p.
8. Matyukhin S.I., Makulevskiy G.R., Deev O.V. Sovremennoe programmnoe obespechenie dlya modelirovaniya v elektronike // *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*. – 2014. – №2 (82). – S.58-71.

#### Matyukhin Sergey Ivanovich

Orel State University, Orel  
DSc, Head of the Department of Technical Physics and Mathematics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph. (4862) 41-98-02  
E-mail: sim1@mail.ru

#### Vasyaev Andrey Arkadyevich

JSC «Proton-Electrotex», Orel  
Design engineer of R&D department of bipolar devices of clamp-on design  
302040, Orel, Leskova st., 19  
Тел. (4862) 44-04-11  
E-mail: a.vasyaev@proton-electrotex.com

#### Murko Alexander Sergeevich

JSC «Proton-Electrotex», Orel  
Design engineer of R&D department of bipolar devices of clamp-on design  
302040, Orel, Leskova st., 19  
Тел. (4862) 44-04-11  
E-mail: a.murko@proton-electrotex.com

#### Titushkin Dmitry Alexandrovich

JSC «Proton-Electrotex», Orel  
Leading engineer of R&D department of bipolar devices of clamp-on design  
302040, Orel, Leskova st., 19  
Тел. (4862) 44-04-11  
E-mail: d.titushkin@proton-electrotex.com

© Матюхин С.И., Мурко А.С., Васяев А.А., Титушкин Д.А., 2025

*Адрес издателя:*

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

*Адрес редакции:*

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

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

Материалы статей печатаются в авторской редакции

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

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

Подписано в печать 17.02.2025 г.  
Дата выхода в свет  
Формат 70X108/16. Усл. печ. л. 16,5  
Цена свободная. Тираж 1000 экз.  
Заказ №

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