



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

**Научно-технический  
и производственный журнал**

**(27) 3 / 2025**

**POWER ENGINEERING:  
RESEARCH, EQUIPMENT,  
TECHNOLOGY**

*Scientific & Technical Journal*

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ,  
Веществ и природной среды

РАСТВОРОВА И.И., СМИРНОВ В.А. Исследование работы измерительной микроэлектроники в низкотемпературных климатических условиях	3
НЬБТЕРЕЙЕ Ф., УСАЧЕВ А.Е., БОБОЕВ Ш.А., КУБАРЕВ А.Ю. Измерительная ячейка для изучения характеристик частичных разрядов в газовых дефектах изоляции	14

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

КАПАНСКИЙ А.А., ПАВЛОВ В.В., ЗАЛИЗНЫЙ Д.И., ВЕРЕМЕЕВА Д.И. Классификация и исследование закономерностей электропотребления частной жилой застройки на основе методов статистического анализа	23
ПЕТРОВ А.Р., ГРАЧЕВА Е.И., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрицехового электроснабжения с учетом основных воздействующих факторов	38
ШАРЫГИН М.В., ДЖЕРИУ АХМЕД САХИБ НАДЖИ, АЛЬШАХЕРИ АММАР МУСА АБДУЛХАСАН. Обнаружение отказов элементов цифровой релейной защиты на примере дифференциально-логической защиты и возможности ее адаптации	53
КОРОВКИН Н.В., САХНО Л.И., ПАРАМОНОВ Е.Д., САХНО О.И. Оптимизация конструкции высоковольтного испытательного трансформатора	69
ТУХВАТУЛЛИН Л.Т., ИСАКОВ Р.Г. Способы повышения стабильности напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий	82
ПЕТРОВ Т.И. Реализация оптимизации синхронного двигателя на основе генетического алгоритма в MATLAB	102
РАХМОНОВ И.У., НИЁЗОВ Н.Н., КУРБОНОВ Н.Н., АХМЕТОВА Р.В., ТАСЛИМОВ А.Д., РАСУЛОВ А.Н. Динамический анализ факторов, влияющих на надежность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях	110

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЛЕВИН В.М., БОЯРОВА Д.А. Распределенная система предиктивного управления состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект	123
ЧЕТОШНИКОВА Л.М., СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ПОЛЯНСКАЯ А.В. Управление потоками реактивной мощности посредством распределенных генераторов	135
ШАМАРОВА Н.А., ШУШПАНОВ И.Н., ФЕДОСОВ Д.С., СУСЛОВ К.В., БАТУХТИН А.Г. Оценка неопределенности электрических нагрузок, обусловленных зарядом электромобилей	147

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ВОЗМИЛОВ А.Г., УРМАНОВ В.Г., ПАНИШЕВ С.А., ЛИСОВ А.А. Экспериментальные исследования мокрого однозонного электрофильтра	162
ЗВЕРЕВА Э.Р., МАРЬИН Г.Е., АХМЕТОВА И.Г., ЩАУЛОВ В.В., ЮСУПОВ К.Н. Водородное топливо – как альтернатива традиционным видам топлива	174
КЛЕЙДМАН О.В., МАСЛОВ И.Н., НИКОЛАЕВА Н.В. Численное моделирование компенсирующих свойств мембранных муфт для повышения надёжности работы газоперекачивающих агрегатов в энергосистемах	187

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ТАХАВИЕВ Т.М., ДМИТРИЕВ А.В. Экономическая эффективность систем с применением твердооксидных топливных элементов на природном газе	198
ГЕНБАЧ А.А., БОНДАРЦЕВ Д.Ю. Теплообмен в капиллярно-пористых природных покрытиях	206
ПЛОТНИКОВА Л.В., КАЛИНИНА М.В. Структурно-термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства	218

## CONTENTS

METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS,  
PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

- RASTVOROVA I.I., SMIRNOV V.A. Study of the performance of measurement microelectronics in low-temperature climatic conditions 3
- NYETEREYE F., USACHEV A.E., BOBOEV SH.A., KUBAREV A.YU. Measuring cell for studying the characteristics of partial discharges in gas defects of insulation 14

## ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

- KAPANSKY A.A., PAVLOV V.V., ZALIZNY D.I., VEREMEEVA D.I. Classification of consumers and analysis of electricity consumption patterns based on variance analysis methods 23
- PETROV A.R., GRACHEVA E.I., ABDULLAZYANOV E.YU. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of in-house power supply taking into account the main influencing factors 38
- SHARYGIN M.V., JERYO AHMED SAHIB NAJI, ALSHAHERI AMMAR MOUSA ABDULHASAN. Detection failure elements in digital relay protection using the example of differential logic protection and the possibility of adaptive protection 53
- KOROVKIN N.V., SAKHNO L.I., PARAMONOV E.D., SAKHNO O.I. Optimization of high-voltage test transformer design 69
- TUKHVATULLIN L.T., ISAKOV R.G. Ways to improve voltage stability in the power supply system of industrial enterprises 82
- PETROV T.I. Implementation of synchronous motor optimization based on genetic algorithm in MATLAB 102
- RAKHMONOV I.U., NIYOZOV N.N., KURBNOV N.N., AKHMETOVA R.V., TASLIMOV A.D., RASULOV A.N. Dynamic analysis of factors affecting the reliability of inverters in large-scale solar power plants 110

## ELECTRIC POWER INDUSTRY

- LEVIN V.M., BOYAROVA D.A. Distributed predictive control system for the condition of power grid equipment based on the operating time for a defect 123
- CHETOSHNIKOVA L.M., SMOLENTSEV N.I., POLYANSKAYA A.V. Control of reactive power flows by means of distributed generators 135
- SHAMAROVA N.A., SHUSHPANOV I.N., FEDOSOV D.S., SUSLOV K.V., BATUKHTIN A.G. Estimation of uncertainty in electrical loads due to electric vehicle charging 147

## ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- VOZMILOV A.G., URMANOV V.G., PANISHEV S.A., LISOV A.A. Experimental studies of a wet single-zone electrofilter 162
- ZVEREVA E.R., MARIN G.E., AKHMETOVA I.G., SHCHAULOV V.V., YUSUPOV K.N. Hydrogen fuel – an alternative to traditional fuels 174
- KLEIDMAN O.V., MASLOV I.N., NIKOLAEVA N.V. Finite element analysis (FEA) of membrane coupling stress under gas pumping unit shafts misalignment 187

## THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

- TAKHAVIEV T.M., DMITRIEV A.V. Economic efficiency of systems using solid oxide fuel cells powered by natural gas 198
- GENBACH A.A., BONDARTSEV D.YU. Heat transfer in capillary-porous natural coatings 206
- PLOTNIKOVA L.V., KALININA M.V. Structural and thermodynamic analysis of the thermal technology scheme of pulp and paper production 218

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-3-13

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Растворова И.И., Смирнов В.А.

Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия  
Vovsm1999@gmail.com

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Применение электронных измерительных устройств в процессе бурения скважин в особенно сложных и уникальных условиях Антарктиды. В условиях экстремально низких температур, которые характерны для этого региона, поставлена задача обеспечить надежную работу электроники, что является критически важным для успешного выполнения буровых операций и получения точных данных. Особое внимание уделено анализу различных методов защиты электронных устройств от отрицательных температур. Исследуются многочисленные подходы к термоизоляции, а также используются инновационные материалы, которые способны минимизировать влияние холодного воздуха на чувствительные компоненты электроники. **ЦЕЛЬ.** Целью работы является исследование актуальных электронных измерительных систем, используемых при бурении скважин в условиях Антарктиды, а также проведение эксперимента над серийными датчиками температуры с использованием охлаждающей камеры. **МЕТОДЫ.** В рамках работы проведены тщательные эксперименты с температурными датчиками различных типов и форматов. Тестирование осуществлялось в специальных охлаждающих камерах, что позволило моделировать реальные условия, с которыми сталкиваются устройства в Антарктиде. Кроме того, в исследовании рассматривается влияние расположения датчиков относительно микрочипов, что также может существенно влиять на их показатели точности и надежности. Важной частью работы стал эксперимент с электроникой, покрытой водонепроницаемым полимерным покрытием. Это покрытие не только защищает устройства от влаги, но и дополнительно изолирует их от холода, что в условиях Антарктики имеет первостепенное значение. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Полученные результаты позволяют сделать выводы о наиболее эффективных способах защиты электронных измерительных устройств для бурения в непростых климатических условиях, а также открывают новые горизонты для дальнейших исследований в данной области.

**Ключевые слова:** бурение; микроэлектроник; температурный датчик; низкие температуры; Антарктида.

**Для цитирования:** Растворова И.И., Смирнов В.А. Исследование работы измерительной микроэлектроники в низкотемпературных климатических условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-3-13.

## STUDY OF THE PERFORMANCE OF MEASUREMENT MICROELECTRONICS IN LOW-TEMPERATURE CLIMATIC CONDITIONS

Smirnov V.A, Rastvorova I.I.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Vovsm1999@gmail.com

**Abstract:** ACTUALLY. The work addresses the topic of using electronic measuring devices in the drilling process of wells under particularly challenging and unique conditions in Antarctica. In the context of extremely low temperatures, characteristic of this region, the task is to ensure the reliable operation of electronics, which is critically important for the successful execution of drilling operations and obtaining accurate data. Special attention is given to analyzing various methods for protecting electronic devices from negative temperatures. Numerous approaches to thermal insulation are explored, and innovative materials are utilized to minimize the impact of cold air on sensitive electronic components. OBJECT. The aim of the work is to investigate current electronic measurement systems used in drilling wells under Antarctic conditions, as well as to conduct experiments on series temperature sensors using a cooling chamber. METHODS. The study includes thorough experiments with temperature sensors of various types and formats. Testing was conducted in specialized cooling chambers, allowing for the modeling of real conditions faced by devices in Antarctica. Furthermore, the study examines the impact of the sensor placement relative to the microchips, which can significantly affect their accuracy and reliability. An important part of the work was an experiment with electronics covered by a waterproof polymer coating. This coating not only protects the devices from moisture but also provides additional insulation against cold, which is of paramount importance in Antarctic conditions. RESULTS. Thus, the results obtained allow conclusions to be drawn about the most effective ways to protect electronic measuring devices for drilling in challenging climatic conditions, as well as opening new horizons for further research in this area.

**Keywords:** drilling; microelectronics; temperature sensor; low temperatures; Antarctica.

**For citation:** Smirnov V.A, Rastvorova I.I. Study of the performance of measurement microelectronics in low-temperature climatic conditions. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 3-13. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-3-13.

### **Введение (Introduction)**

Изучение подледниковых озер Антарктиды, а также самого ледяного покрова материка уже долгое время интересует мировое научное сообщество из разных сфер, поскольку они имеют уникальную, неискаженную воздействием человека информацию о Земле. Для детального исследования ледяного покрова необходимо производить отбор керн на различных глубинах. Также немалый интерес представляют подледниковые озера, расположенные на больших глубинах. Бурение осложняется следующими факторами:

Сложная логистика. Транспортировка металлоемких конструкций и большого количества топлива очень ресурсозатратна, а в некоторых случаях – невозможна.

Сложные климатические условия (давление, температура).

Уникальная природная зона. Загрязнение или нарушение экологии может привести к необратимым последствиям.

На сегодняшний день электромеханическая буровая установка, используемая Российской экспедицией в Антарктиде, не обладает достаточным количеством электронных измерительных средств, что приводит к снижению эффективности и скорости бурения. В условиях Антарктики эффективное бурение непосредственно зависит от точности измерений, что в свою очередь определяется качеством электронных систем, участвующих в процессе. Наличие современных измерительных приборов позволяет не только оперативно получать данные о состоянии окружающей среды и самих буровых установок, но и минимизировать возможные ошибки, связанные с изменением климатических условий. Использование современной микроэлектроники осложняется в первую очередь уникальными климатическими условиями [1,2], в частности низкой температурой и атмосферным давлением. Эти факторы могут влиять на функционирование и точность измерительных систем, а также приводить к увеличению вероятности поломок

оборудования в условиях резких температурных перепадов. Иностраные буровые установки имеют гораздо более современное электронное сопровождение, но которое также имеет ряд недостатков [3]. Так из результатов исследований на станции Восток удалось выявить слабые места в измерительной технике и установить возможности в доработке измерительного оборудования [4,5]. Целью работы является исследование актуальных электронных измерительных систем, используемых при бурении скважин в условиях Антарктиды, а также проведение эксперимента над серийными датчиками температуры с использованием охлаждающей камеры. Для достижения цели необходимо проанализировать современные технологии в этой области, определить их недостатки и оптимизировать процесс, что позволит повысить эффективность буровых работ и обеспечить более качественные и надежные результаты измерений процесса бурения.

Попадание внутрь электронного прибора даже небольшого количества влаги может быть разрушительно. Существует стандарт степени защиты электронных приборов ГОСТ 14254-2015. На производствах или месторождениях, где электроника расположена в непосредственной близости с водной средой, используются приборы, изготовленные по стандарту IP68 и IP69 (с пометкой о максимальном давлении жидкости). Для выполнения требований этих стандартов наиболее распространенный метод – использование водонепроницаемых корпусов, но он имеет ряд недостатков [6].

Полимерные защитные покрытия в отличие от корпусной герметизации наиболее экономичным и менее трудоемким методом.

Уникальным и наиболее эффективным методом надежной защиты электронных устройств различного назначения от внешних факторов является нанесение поли-пара-ксилениловых из газовой фазы в вакууме. Покрытия, получаемые вакуумным осаждением, имеют существенное отличие по структуре и свойствам от покрытий, формируемых из жидких сред, и реализуют свои защитные свойства при значительно меньших толщинах. Процесс получения ППКП осуществляется на специальных вакуумных установках.

Буровые работы в Антарктиде осложнены низкими температурами на поверхности и в ледниках, отсутствием дорог и инфраструктуры, штормовыми ветрами, снегопадами и другими погодными явлениями. Традиционные роторные буровые установки для бурения керна в ледниках должны иметь большой вес и мощность, что затрудняет их адаптацию для исследования ледников. Для бурения глубоких скважин в Антарктиде были разработаны специальные электромеханические буры на тросовой подвеске. Основной особенностью электромеханической технологии бурения льда является способ опускания и подъема бура в скважину. Вместо труб, которые используются в обычных роторных буровых установках для подачи энергии для разрушения горных пород на забое скважины и извлечения используется забойная установка, бронированный трос и лебедка.

Такая конструкция не только снижает массу и энергопотребление бурового оборудования, но и сокращает время проходки в скважину и из скважины, упрощает очистку скважины от шлама. Технологии по очистке скважины от шлама также модифицируются.

Первая электромеханическая установка была разработана в США в 1940 году. Немного позже в 1956 в СССР была разработана собственная буровая установка для бурения в условиях Антарктиды.

В настоящее время все буровые установки, используемые в Антарктиде, имеют тепловые, герметичные камеры для размещения в них электроники, производящей мониторинг параметров процесса бурения [7].

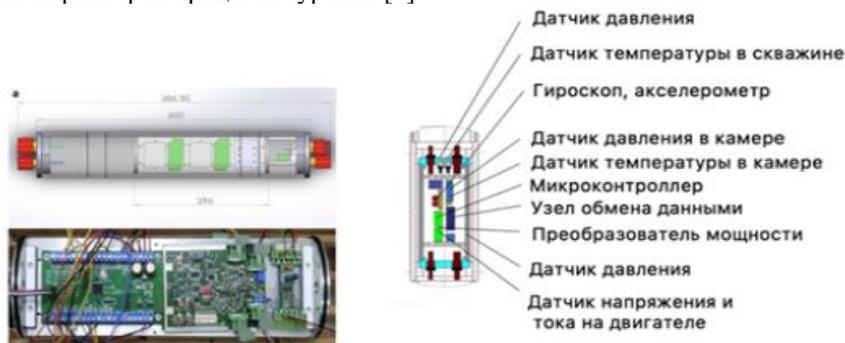


Рис. 1 – Внешний вид и расположение элементов в тепловой камере

Fig. 1 - Appearance and arrangement of elements in the thermal chamber

\*Источник: [8] Source:[8].

Антарктической подледниковой буровой установке, разработанной в Центре полярных исследований Университета Цзилинь, Китай (Рис. 1). В этом случае применяется уникальное технологическое решение и конструкция измерительного устройства, расположенного в тепловой камере. Помимо поддержания климата вокруг электронного устройства, тепловая камера является еще и защитой от ударов, высокого уровня вибраций, попадания крупных и мелких частиц керна, а также от влаги. Такое решение хорошо показало себя на практике [8]. Благодаря автоматически поддерживаемому климату в камере есть возможность расположить недорогую электронику, неприспособленную к сложным температурным условиям. Помимо применения электроники в процессе глубокого бурения, также большое значение ее использование имеет в геофизических исследованиях. Каротаж скважин в ледниках представляет собой важный источник информации о физической обстановке в скважине и решает две основные задачи: контролировать техническое состояние скважины и изучать структуру льда [9,10].

Российская экспедиция использует буровую установку марки КЭМС-132 (Рис. 2). Данная буровая установка показала себя как одно из лучших решений для бурения в условиях Антарктиды. С ее помощью была пробурена самая глубокая скважина в этом регионе [11].

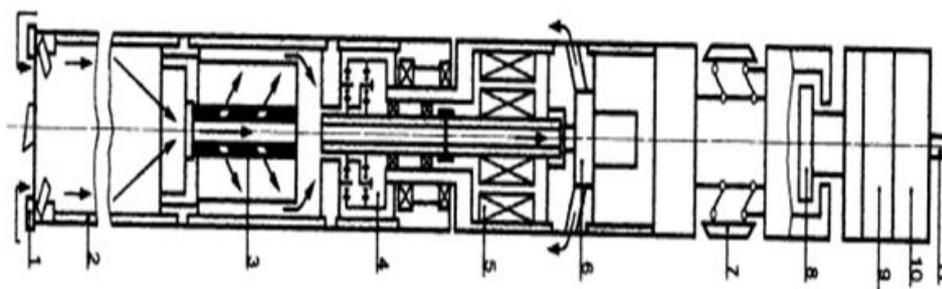


Рис. 2 – Электромеханический бур КЭМС-132: 1 - буровая головка, 2 - колонковый бур, 3 - камера с фильтром для шлама, 4 - редуктор, 5 - приводной электродвигатель, 6 - насос, 7 - противомоментная система, 8 - ударный блок, 9 - электрокамера, 10 - скоба подвеса троса, 11 – трос

Fig. 2 - Electromechanical drill KEMS-132: 1 - drilling head, 2 - column drill, 3 - chamber with a mud filter, 4 - gearbox, 5 - drive electric motor, 6 - pump, 7 - counter-torque system, 8 - impact block, 9 - electric chamber, 10 - cable suspension bracket, 11 - cable

\*Источник: [11] Source:[11].

В настоящее время специально для ледниковых исследований разработаны кусочные скважинные регистраторы на основе использования 3D-акселерометров и 3D-магнитометров. Эти регистраторы использовались для получения кинематических измерений текучего льда на леднике Джарвис, Аляска [10,12] и для определения профиля деформации ледника, который определяется по измерениям наклона скважины на леднике Store, Гренландия [13]. Новый скважинный регистратор, предназначенный для сверхнизких температур и сверхвысоких давлений, разработанный в Центре полярных исследований Цзилиньского университета в Китае, позволяет одновременно измерять несколько параметров скважины: температуру, давление, угол наклона скважины, азимут скважины, ориентированный по стволу диаметр и поперечное сечение, разрез [14,15].

Основной проблемой использования электроники в условиях Антарктиды является ее ненадежная защита от воздействия низкотемпературной среды, влажности и вибраций. Как было отмечено выше, все электронные компоненты буровой установки располагают в тепловые герметичные камеры, которые обладают следующими проблемами:

1. Высокое энергопотребление, расходуемое на обогрев камеры.
2. Высокий риск повреждения герметичности камеры.

В условиях Антарктиды, где существуют большие проблемы с логистикой, и как следствие ограниченного количества топлива, необходимо избегать лишнего потребления электроэнергии. А поскольку буровые установки в сезон бурения работают круглосуточно, то потребление энергии на обогрев электроники нельзя недооценивать.

При повреждении камеры происходит нарушение теплоизоляционного слоя, что приводит к большим потерям энергии. Расчет этих потерь дает понимание о невозможности функционирования оборудования в штатном режиме, что приводит к снижению времени и качества работы [16,17]. Также появляется риск попадания влаги внутрь корпуса с

электроникой, что приведет к выводу ее из строя, что в некоторых случаях может быть недопустимо.

Для решения проблемы надежности одним из способов является использование сразу несколько дублирующих друг друга камер с датчиками, как представлено на рисунке 3



Рис. 3 – Тепловая герметичная камера с четырьмя блоками измерительных устройств

Fig. 3 - Thermal hermetic chamber with four measuring device units

\*Источник: [18] Source:[18].

Решение использовать несколько аналогичных устройств повышает надежность в ущерб стоимости и потребления энергии.

Еще одним способом повышения надежности является использование датчика разгерметизации методом обнаружения утечек, основанном на контроле влажности. В электронной камере давления установлен датчик влажности на основе емкостного датчика. Если камера давления протекает, протечка воды на чувствительной к влаге емкости вызывает изменение емкости, и обнаруживается заметное увеличение влажности. Утечка воды может быть обнаружена по значительному изменению влажности в камере. Китайские исследователи проверили данный метод на практике с непроводящей чистой водой. Экспериментальные результаты показывали, что этот метод реализуем [7].

Большинство производимой промышленной микроэлектроники с микросхемами менее 1 мкм имеют рабочий температурный диапазон от -40 до +70 градусов. Это связано с использованием полупроводниковых технологий в их основе. В бытовых условиях, условиях промышленного производства температура окружающей среды, как правило, не превышает устанавливаемого производителями микросхем диапазона, но нередко появляется необходимость в различных электронных устройствах и в более сложных температурных условиях. При высоких температурах электроника деградирует, а при температурах превышающих температуру плавления материалов интегральной схемы или микросхем устройство полностью или частично перестанет выполнять свои функции. Также есть большая вероятность короткого замыкания вследствие повреждения контактных площадок, что может привести к возгоранию. В настоящий момент наиболее распространенным способом защиты электроники от воздействия температур является использование материалов с фазовым переходом, в частности парафин. Такие покрытия позволяют защитить не только микроэлектронику, но и аккумуляторы. Литий-ионные (Li-ion) батареи были являются источником питания для электронных устройств благодаря их высокой плотности энергии и мощности. Тем не менее, чувствительный к температуре литий-ионный аккумулятор требует строгих температурных условий от 20 до 55 °C для работы с высокой производительностью и высокой безопасностью. При высоких температурах выше 55 °C аккумуляторы подвержены потере емкости или даже тепловому разгону, что может привести к пожарам и взрывам. В то же время низкие температуры снижают проводимость электролита и скорость диффузии ионов лития батареи, что приводит к падению напряжения, необратимой потере емкости или даже внутреннему короткому замыканию [17,19].

Для питания электроники с можно использовать суперконденсаторы, которые менее подвержены воздействию температур. Современные конденсаторы могут обладать даже большими емкостями, нежели традиционные литий-ионные и питать электронику с напряжением в тысячи вольт. Таким образом, можно избежать огромных затрат энергии, уходящих на обогрев изолированной камеры.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В качестве объектов исследования было взято следующее электронное оборудование в количестве четырех экземпляров:

1. Микроконтроллер PIC16F18855
2. Цепь для измерения температуры основанная на полупроводниковых диодах

Микроконтроллеры PIC16F18855 оснащены аналоговыми, независимыми от ядра периферийными устройствами и периферийными устройствами связи в сочетании с технологией экстремально низкого энергопотребления (XLP) для широкого спектра приложений общего назначения и с низким энергопотреблением. Платы поддерживают множество функций, включая светодиоды, датчики температуры, переключатели, динамики, интерфейсы RS-232. Данные микроконтроллеры получили широкое распространение в системах умного дома благодаря своей универсальности и производительности.

Полупроводниковые датчики температуры используются для широкого диапазона задач как промышленных условиях, так и бытовых. Физический принцип функционирования полупроводникового термометра заключается в том, что падение напряжения на прямосмещенном p-n переходе зависит от температуры. Эта зависимость имеет характеристики, близкие к линейным, что дает возможность разрабатывать датчики, которые не нуждаются в усложненных схемах для корректировки показаний [19].

Эксперимент проводился в холодильной камере с пределом отрицательной температуры в -60 градусов и был разделен на два этапа с отличными друг от друга начальными условия эксплуатации микроконтроллера. Это позволяет создать необходимые условия для изучения работы выбранных объектов в экстремально низкотемпературной среде. Заведомо известно, что в условиях низких температур могут возникать различные физические явления, которые могут повлиять на функционирование электронных элементов, такие как изменение электрических характеристик и увеличенный риск появления конденсата. На первом этапе микроконтроллер был исследован в условиях, приближенных к стандартным, чтобы получить базовые характеристики его работы и затем подвержен воздействию температурного диапазона в -60 градусов. Это был основной этап, на котором мы планировали оценить, как низкие температуры влияют на работу электроники, а также на точность показаний термометра. На этом этапе важно отметить, что при понижении температуры электроника может демонстрировать различные эффекты, такие как задержка в обработке данных, нестабильность напряжения и температурные колебания, что может привести к ошибкам в измерениях. Основные параметры, которые измерялись в этот период, включали в себя стабильность работы процессора при заданной температуре и стабильность работы датчиков температуры. Этот этап был необходим для создания контрольной базы, с которой можно было бы сравнивать результаты, полученные в условиях низких температур.

Второй этап включал в себя проверку работоспособности оборудования, которое было предварительно охлаждено в холодильной камере до необходимой для измерений температуры, и сравнения результатов с полученными в первом этапе данными.

Важным аспектом, который также учитывался в ходе эксперимента, было влияние конденсата, который мог образовываться на поверхности оборудования из-за разницы температур между внутренней средой холодильной камеры и внешней атмосферой. Образование конденсата представляет собой значительную угрозу для работы микроэлектронных компонентов, так как может привести к коротким замыканиям и повреждению схем. Чтобы минимизировать риск, один из микроконтроллеров был покрыт влагозащитным пленочным покрытием. Это покрытие обеспечивает защиту от влаги, создавая барьер, который препятствует попаданию воды на чувствительные элементы устройства.

Для анализа степени воздействия этого физического явления на эксперимент один из контроллеров был покрыт влагозащитным пленочным покрытием. Использовались полимерные материалы, которые обеспечивают не только защиту от влаги, но и сохраняют свои изоляционные свойства при низких температурах. Этот эксперимент был направлен на то, чтобы продемонстрировать, как применение влагоустойчивых технологий может

улучшить долговечность и надежность работы электронных компонентов в экстренных условиях.

### Результаты (Results)

Производитель выбранной электроники указывает предел низкой температуры до -40 градусов по Цельсию. Температура в антарктических условиях может достигать порядка -60 градусов. В первом эксперименте мы производили запуск электронных устройств в помещении при комнатной температуре, затем помещали их в охлажденную до -60 градусов камеру и постепенно ее нагревали. Несмотря на температуру в камере ниже, чем заявлена производителем, устройства отработали в штатном режиме (рис. 4)

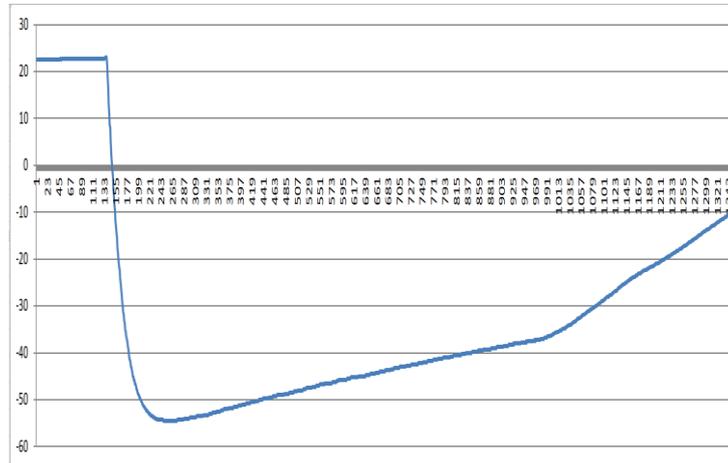


Рис. 4 – График изменения температуры при запуске устройства в комнатной температуре (по вертикальной оси – значения температуры в градусах по Цельсию, по горизонтальной – время в секундах)

Fig. 4 - Temperature change chart during device startup at room temperature (vertical axis - temperature values in degrees Celsius, horizontal axis - time in seconds)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Во втором эксперименте было принято решение производить запуск, предварительно охладив устройства в камере. Все устройства запустились нормально, но показания температурного датчика стали нелинейными. Среднее отклонение температуры составило 5 градусов по Цельсию (рис. 5).

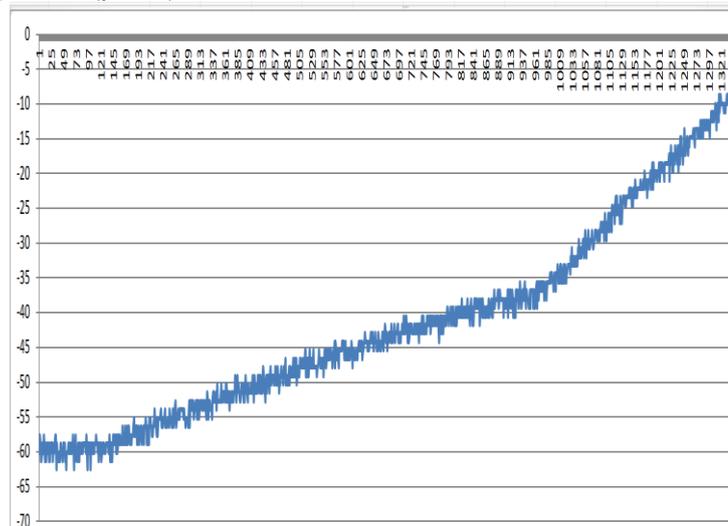


Рис. 5 – График изменения температуры при запуске устройства в охлажденной камере температуре (по вертикальной оси – значения температуры в градусах по Цельсию, по горизонтальной – время в секундах)

Fig. 5 - Temperature change chart during device startup in a cooled chamber (vertical axis - temperature values in degrees Celsius, horizontal axis - time in seconds)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оба эксперимента были повторены три раза и результаты оказались аналогичными.

Мы предполагаем, что такую ошибку может давать полупроводниковый диод в цепи измерения температуры. Планируется дальнейшее исследование его вольт-амперной характеристики в различных температурных условиях.

Также, в эксперименте одно из устройств было покрыто специальным влагозащитным полимером, но его наличие не повлияло на результаты.

#### ***Обсуждение (Discussion)***

По результатам исследования, можно утверждать, что выбранный серийный микроконтроллер и температурные датчики являются надежными компонентами, способными функционировать в экстремальных условиях, с некоторыми оговорками относительно отклонений в показаниях полупроводниковых датчиков. На основе полученных данных, вытекают следующие рекомендации для дальнейших исследований и практического применения:

1. Дальнейшие испытания при экстремальных температурах: Рекомендуется проведение дополнительных тестов на устойчивость микроконтроллеров и датчиков при температурах, находящихся за пределами современных испытаний, чтобы определить границы их эксплуатации и выявить возможные точки отказа.

2. Калибровка полупроводниковых датчиков: Введение программных решений для калибровки полупроводниковых датчиков с учетом отклонений, зафиксированных в ходе нашего эксперимента, позволит повысить точность и надежность систем, основанных на этих датчиках.

3. Исследование влияния внешних факторов: Так же необходимо уделить внимание изучению влияния внешних факторов, таких как влажность, давление влияние магнитных полей на характеристики датчиков с покрытием и без, что даст более полное понимание их эксплуатационных возможностей.

4. Анализ долговечности и износостойкости: Для значительного повышения надежности применения датчиков и контроллеров в длительных и экстремальных условиях стоит рассмотреть возможность использования различных защитных покрытий конструкторских решений, а так же их влияние на долговечность компонентов.

Рекомендации могут послужить основой для дальнейших исследований, целью которых станет создание более точного и надежного измерительного оборудования, способного работать в условиях экстремально низких температур. Они также подчеркивают необходимость комплексного подхода к разработке промышленных систем, что в конечном итоге может привести к повышению их эффективности и долговечности в эксплуатации.

#### ***Заключение (Conclusions)***

В ходе исследования были проанализированы современные методы противодействия негативным последствиям отрицательных температур для электроники. Результаты работы предоставляют ценные данные для дальнейшего использования полученной информации в тех областях, где стабильность работы оборудования при изменении климатических условий играет критическую роль.

По результатам эксперимента сделаны следующие выводы:

- выбранные серийные микроконтроллеры и температурные датчики демонстрируют высокую степень устойчивости к низким температурам, при этом не выходя из строя даже при значительных отклонениях от предельно допустимых значений, установленных производителем. Обнаруженные отклонения в температурном режиме в пределах 15-20 градусов Цельсия ниже указанной основаны на результатах испытаний, что говорит о значительном запасе прочности этих компонентов;

- разница в показаниях температурных датчиков с покрытием и без него оказалась незначительной. Выбранные датчики при наличии защитной пленки или без нее работают с высокой точностью и надежностью в необходимых нам условиях. Такой результат подчеркивает, что не всегда целесообразно использовать дополнительные защитные покрытия для достижения стабильности измерений. Однако стоит отметить, что отсутствие покрытия может указывать на снижение износостойкости в условиях длительного воздействия внешних факторов. Для более точной оценки целесообразности использования покрытия для повышения долговечности и устойчивости датчиков к внешним воздействиям необходимы дальнейшие исследования;

- при запуске полупроводникового температурного датчика в условиях низких температур обнаружены отклонения в среднем 5 градусов по Цельсию. В связи с этим следует вывод, что существует необходимость разработки методов коррекции и более точной калибровки для учета этого смещения.

## Литература

1. X.K. Yu, Y.B. Tao, Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity, (2022) International Journal of Heat and Mass Transfer, p. 123433 doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123433
2. Serbin, D. V., & Dmitriev, A. N. (2022). Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. Journal of Mining Institute, 257, 833-842. doi:10.31897/PMI.2022.82
3. Zhang N et al. (2020). Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part IV. Electrical and Electronic Control System. Annals of Glaciology 1–12. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>
4. Shishkin, E. V., Bolshunov, A. V., Timofeev, I. P., Avdeev, A. M., & Rakitin, I. V. (2022). Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake Vostok. Journal of Mining Institute, 257, 853-864. doi:10.31897/PMI.2022.53
5. Bolshunov, A. V., Vasilev, D. A., Ignatiev, S. A., Dmitriev, A. N., & Vasilev, N. I. (2022). Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. [Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом] *Led i Sneg*, 62(1), 35-46. doi:10.31857/S2076673422010114
6. Shilin Peng, Xiao Jiang, Yongzhen Tang, Chong Li, Xiaodong Li, Shengmiao Huang, Tianxin Zhu, Jianguang Shi, Youhong Sun, Pavel Talalay, Xiaopeng Fan, Nan Zhang, Bing Li, Da Gong and Haibin Yu (2021). Recoverable autonomous sonde for subglacial lake exploration: electronic control system design. *Annals of Glaciology* 62(85-86), 263–279. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.1>
7. Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring Author links open overlay panel Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.011>.
8. Lee, Ian & Hawley, Robert & Bernsen, Steven; Campbell, Seth & Clemens-Sewall, David & Gerbi, Christopher & Hruby, Kate. (2019). A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. *Journal of Glaciology*. 66. 1-9. 10.1017/jog.2019.84.
9. Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system Xiaojun Shi a,b, Heping Xie a,b, Cong Li a,b,\* , Jianan Li a,b, Guikang Liu a,b, Zhenxi You b,c, Mingzhong Gao <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>
10. Sterkhov I.A. Kraev N. A., Denisova O. V Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396635
11. Васильев, Н. И., А. Н. Дмитриев и П. А. Блинов (2012), Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток, Вестник ОНЗ РАН, 4, NZ2001, doi:10.2205/2012NZ000111.
12. Doyle, Samuel & Hubbard, Bryn & Christoffersen, Poul & Young, Tun Jan & Hofstede, Coen & Bougamont, Marion & Box, Jason & Hubbard, Alun. (2018). Physical Conditions of Fast Glacier Flow: 1. Measurements From Boreholes Drilled to the Bed of Store Glacier, West Greenland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 123. 10.1002/2017JF004529.
13. Markov, Aleksey & Talalay, Pavel & Sysoev, Mikhail & Miller, Andrey; Cherepakhin, Alexander. (2021). Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers. *Annals of Glaciology*. 62. 1-11. 10.1017/aog.2021.17.
14. Mortensen, N., Goetz, J., Gibson, C., Johnson, J., & Shturmakov, A. (2014). Replicate ice-coring system architecture: Electrical, electronic and software design. *Annals of Glaciology*, 55(68), 156-164. doi:10.3189/2014AoG68A014
15. Moon, Sung In & Extrand, C. (2009). Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research – IND ENG CHEM RES*. 48. 10.1021/ie900842t.
16. Исмоилов И.И., Грачева Е.И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). С. 3-12.
17. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзакар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>.
18. Bons, P., Jansen, D., Mundel, F. et al. Converging flow and anisotropy cause large-scale folding in Greenland's ice sheet. *Nat Commun* 7, 11427 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11427>.
19. Петросянец К.О., Исмаил-Заде М.Р., Самбурский Л.М. Особенности моделирования ВАХ JFET-транзисторов в диапазоне криогенных температур // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 2. – С. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184

### Авторы публикации

**Растворова Ирина Ивановна** – д-р техн. наук, доцент кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета. Email: [rastvorova@mail.ru](mailto:rastvorova@mail.ru).

**Смирнов Владимир Алексеевич** – аспирант кафедры Электронных систем Санкт-Петербургского Горного университета. Email: [Vovsm1999@gmail.com](mailto:Vovsm1999@gmail.com)

### References

1. X.K. Yu, Y.B. Tao, Preparation and characterization of paraffin/expanded graphite composite phase change materials with high thermal conductivity,(2022) InternationalJournalofHeatandMassTransfer, p. 123433 doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123433
2. Serbin, D. V., & Dmitriev, A. N. (2022). Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter. Journal of Mining Institute, 257, 833-842. doi:10.31897/PMI.2022.82
3. ZhangNetal. (2020). Antarctic Subglacial Drilling Rig: Part IV. Electrical and Electronic Control System. AnnalsofGlaciology 1–12. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.40>
4. Shishkin, E. V., Bolshunov, A. V., Timofeev, I. P., Avdeev, A. M., & Rakitin, I. V. (2022). Model of a walking sampler for research of the bottom surface in the subglacial lake vostok. Journal of Mining Institute, 257, 853-864. doi:10.31897/PMI.2022.53
5. Bolshunov, A. V., Vasilev, D. A., Ignatiev, S. A., Dmitriev, A. N., & Vasilev, N. I. (2022). Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. [Mekhanicheskoye bureniye lednikov s ochistkoy zaboya szhatym vozdukhom] Led i Sneg, 62(1), 35-46. doi:10.31857/S2076673422010114
6. Shilin Peng , Xiao Jiang, Yongzhen Tang, Chong Li, Xiaodong Li, Shengmiao Huang, Tianxin Zhu, Jianguang Shi, Youhong Sun, Pavel Talalay , Xiaopeng Fan, Nan Zhang, Bing Li, Da Gong and Haibin Yu (2021). Recoverable autonomous sonde for subglacial lake exploration: electronic control system design. Annals of Glaciology 62(85-86), 263–279. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.1>
7. Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring Author links open overlay panel Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.10.011>.
8. Lee, Ian & Hawley, Robert & Bernsen, Steven; Campbell, Seth & Clemens-Sewall, David & Gerbi, Christopher & Hruby, Kate. (2019). A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. Journal of Glaciology. 66. 1-9. 10.1017/jog.2019.84.
9. Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system Xiaojun Shi a,b , Heping Xie a,b , Cong Li a,b,\* , Jianan Li a,b , Guikang Liu a,b , Zhenxi You b,c , Mingzhong Gao <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.012>
10. Sterkhov I.A. Kraev N. A., Denisova O. V Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396635
11. Vasilyev, N. I., A. N. Dmitriev i P. A. Blinov (2012), Bureniye glubokoy skvazhiny na rossiyskoy antarkticheskoy stantsii Vostok, Vestnik ONZ RAN, 4, NZ2001 doi:10.2205/2012NZ000111.
12. Doyle, Samuel & Hubbard, Bryn & Christoffersen, Poul& Young, Tun Jan & Hofstede, Coen& Bougamont, Marion & Box, Jason & Hubbard, Alun. (2018). Physical Conditions of Fast Glacier Flow: 1. Measurements From Boreholes Drilled to the Bed of Store Glacier, West Greenland. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 123. 10.1002/2017JF004529.
13. Markov, Aleksey & Talalay, Pavel& Sysoev, Mikhail & Miller, Andrey; Cherepakhin, Alexander. (2021). Borehole multi-functional logger for geophysical high-precision monitoring in Antarctic and Greenland ice sheets and glaciers. Annals of Glaciology. 62. 1-11. 10.1017/aog.2021.17.
14. Mortensen, N., Goetz, J., Gibson, C., Johnson, J., & Shturmakov, A. (2014). Replicate ice-coring system architecture: Electrical, electronic and software design. Annals of Glaciology, 55(68), 156-164. doi:10.3189/2014AoG68A014
15. Moon, Sung In & Extrand, C.(2009). Water Vapor Permeation Resistance of Polycarbonate at Various Temperatures. Industrial & Engineering Chemistry Research – IND ENG CHEM RES. 48.10.1021/ie900842t.
16. Ismoilov I.I., Gracheva E.I. Povyshenie upravlyaemosti energeticheskimi sistemami i uluchshenie kachestva elektroenergii // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2022. T. 14. №1 (53). S. 3-12.
17. Abdul lazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. Prognozirovanie i analiz elektropotrebleniya i potery elektroenergii na promyshlennykh ob'yektakh.

© *Смирнов В.А., Растворова И.И.*

Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI. 2022;24(6):3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. 18. Bons, P., Jansen, D., Mundel, F. et al. Converging flow and anisotropy cause large-scale folding in Greenland's ice sheet. Nat Commun 7, 11427 (2016).<https://doi.org/10.1038/ncomms11427>.

19. Petrosyants K.O., Ismail-Zade M.R., Samburskiy L.M. Osobennosti modelirovaniya VAKH JFET-tranzistorov v diapasone kriogennykh temperatur // Izv. vuzov. Elektronika. – 2019. – Т. 24. – № 2. – S. 174–184. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-2-174-184.

#### **Authors of the publication**

**Irina I. Rastvorova** - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electronic Systems, Saint Petersburg Mining University. Email: [rastvorova@mail.ru](mailto:rastvorova@mail.ru)

**Vladimir A. Smirnov** – graduate student at the Department of Electronic Systems, Saint Petersburg Mining University. Email: [Vovsm1999@gmail.com](mailto:Vovsm1999@gmail.com)

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.*

**Получено** **03.02.2025 г.**

**Отредактировано** **10.02.2025 г.**

**Принято** **17.02.2025 г.**



## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ГАЗОВЫХ ДЕФЕКТАХ ИЗОЛЯЦИИ

Ньетерейе Ф., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

[aleksandr\\_usachev@rambler.ru](mailto:aleksandr_usachev@rambler.ru), [shuhrar1004@mail.ru](mailto:shuhrar1004@mail.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в расчёте конструкции ячейки для измерения характеристик частичных разрядов (ЧР), возникающих в газовых дефектах внутри твёрдой изоляции. Размеры и объём газовых включений в изоляцию связаны с характеристиками ЧР, которые в этих дефектах происходят. Знание деталей этой связи для дефектов различных размеров и форм необходимо для правильной диагностики состояния изоляции аппаратов высоких напряжений и определения их остаточного ресурса. Эта связь в настоящее время изучена в недостаточной степени. Задача изучения ЧР осложняется их малой величиной и сложностью отделения ЧР в газовых дефектах от поверхностных, коронных ЧР и посторонних случайных шумов, имеющих подобный спектр. ЦЕЛЬ работы состоит в создании экспериментальной установки с измерительной ячейкой, в которой нет коронных и поверхностных ЧР, которые осложняют получение достоверных результатов при измерении ЧР в газовых порах диэлектрика. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся расчет напряжённости электрического поля в различных конструкциях ячейки методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics 6.2. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, приведены результаты расчёта распределения электрических полей при различной конфигурации высоковольтных электродов рассмотрены, результаты измерения ЧР в контрольных (бездефектных) образцах и образцах с дефектами. Доказано, что в предлагаемой конструкции ячейки отсутствуют поверхностные и коронные ЧР на электродах, что позволяет изучать характеристики ЧР в газовых дефектах изоляции. Установлено, что ЧР в газовом дефекте происходят в первой и третьей части каждого периода синусоиды промышленной частоты при одинаковой разности потенциалов между электродами. Сдвига напряжения возникновения ЧР, который предсказывался из-за предполагаемого остаточного заряда на стенках каверны, не обнаружено.

**Ключевые слова:** частичный разряд, дефекты изоляции, измерительная ячейка, напряжённость возникновения ЧР, диагностика изоляции.

**Для цитирования:** Ньетерейе Ф., Усачев А.Е., Бобоев Ш.А., Кубарев А.Ю. Измерительная ячейка для изучения характеристик частичных разрядов в газовых дефектах изоляции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 14 - 22. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22.

## MEASURING CELL FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF PARTIAL DISCHARGES IN GAS DEFECTS OF INSULATION

Nyetereye F., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Kubarev A.Yu.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

[aleksandr\\_usachev@rambler.ru](mailto:aleksandr_usachev@rambler.ru), [shuhrar1004@mail.ru](mailto:shuhrar1004@mail.ru)

**Abstract:** The ACTUALITY of the study is to calculate the design of a cell to measure the characteristics of partial discharges (PD) occurring in gas defects within solid insulation. The size and volume of gas inclusions in the insulation are related to the PD characteristics that occur in these defects. Knowledge of the details of this relationship for defects of various sizes and shapes is necessary for proper diagnosis of the insulation condition of high voltage apparatuses and determination of their residual life. This connection is currently studied to an insufficient extent. The task of studying PDs is complicated by their small magnitude and the difficulty of separating PDs in gas defects from surface, corona PDs and extraneous random noises having a similar

*spectrum. OBJECTIVE of the work is to create an experimental setup with a measuring cell in which there are no corona and surface PDs, which complicate obtaining reliable results when measuring PDs in gas pores of a dielectric. METHODS. The calculation of the electric field strength in various cell designs by the finite element method in the ComSol-Multiphysics 6.0 program was used to solve the problem. RESULTS. The paper describes the relevance of the topic, presents the results of calculation of electric field distribution at different configurations of high-voltage electrodes, the results of PD measurements in control (defect-free) samples and samples with defects. It is proved that in the proposed design of the cell there are no surface and corona PDs on the electrodes, which allows us to study the characteristics of PDs in gas defects of insulation. It is established that PDs in a gas defect occur in the first and third parts of each period of a sinusoid of industrial frequency at the same potential difference between the electrodes. No shift of the PD occurrence voltage, which was predicted due to the assumed residual charge on the cavern walls, was found.*

**Keywords:** *partial discharge; insulation defects; measuring cell; PD occurrence voltage; insulation diagnostics.*

**For citation:** Nyetereye F., Usachev A.E., Boboev Sh.A., Kubarev A.Yu. Measuring cell for studying the characteristics of partial discharges in gas defects of insulation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 14-22. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-14-22.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время общепризнанно считается, что основной причиной ухудшения свойств изоляции являются частичные разряды (ЧР). Регистрация характеристик частичных разрядов позволяет оценивать состояние изоляции высоковольтных аппаратов и выявлять местные дефекты, которые практически невозможно определить стандартными высоковольтными испытаниями или измерениями каких-либо интегральных характеристик изоляции (тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции и др.) [1,2]. Условия наблюдения ЧР в высоковольтных лабораториях и в различных объектах электроэнергетики при их эксплуатации существенно различаются [3,4]. Для каждого типа высоковольтного оборудования следует учитывать эти различия и вносить изменения в изначальную модель ЧР [5-7]. Основные измеряемые характеристики одиночного ЧР – амплитуда броска напряжения (тока) и мгновенное значение напряжения, при котором он происходит, существенно искажаются в условиях измерений под нагрузкой [8]. Так при измерении ЧР в работающих турбогенераторах (ТГ) амплитуда ЧР снижается из-за влияния электродвижущей силы (ЭДС) ТГ, а напряжение возникновения невозможно определить из измерений фазы ЧР вследствие различия напряжения в различных частях ТГ и неопределённости места возникновения ЧР [9,10]. Одним из основных представлений результатов регистрации ЧР является амплитудно–фазовое представление [1,2]. В лабораторных условиях это представление хорошо отображает распределение ЧР, поскольку в большинстве случаев исследуется только один дефект круглой или эллипсоидальной формы. Так в серии работ [11,12] исследовалась связь между характеристиками ЧР и размером дефекта. В обзорных работах [13,14] приводятся результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований условий возникновения разрядов в газовых промежутках при атмосферном давлении. При измерении ЧР в работающем трёхфазном оборудовании высокого напряжения (силовых трансформаторах, кабелях, синхронных генераторах и т.п.) возникает проблема множества ЧР [15,16]. На аппаратном уровне трудно разделить ЧР, происходящие в обследуемом аппарате, от ЧР, возникающих в других устройствах и приходящих по линиям на датчики. Отделить ЧР, возникающие в различных фазах одного и того же аппарата, также не простая задача. В результате такого не учёта регистрируемая напряжённость возникновения ЧР оказывается ниже необходимой для существования самостоятельного разряда, т.е. ЧР при такой напряжённости происходить не может [8]. Для объяснения этого противоречия используется предположение об остаточном заряде, который «оседает» на стенках каверны, подобно краске в технологиях электроокраски, что в свою очередь, противоречит принципу запрета Паули. Число повреждений полимерных цепей на границе диэлектрической каверны объёмом 1 мм<sup>3</sup> не превышает нескольких тысяч, что явно недостаточно для объяснения наблюдений ЧР при малых значениях напряжённости электрического поля. В Цель исследования заключается в создании измерительной ячейки, в которой могут наблюдаться только ЧР от внутренних

дефектов изоляции. Научная значимость исследования состоит в том, что такая ячейка позволяет надёжно установить связь между характеристиками ЧР и размерами дефектов изоляции. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты исследований позволят повысить достоверность и предсказательную способность диагностики изоляции методом ЧР.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Схема испытательной установки для измерения характеристик ЧР в газовых порах изоляции показана на рисунке 1. Источником регулируемого по величине высокого напряжения (ВН) являлся аппарат АИИ-70. Высоковольтный испытательный трансформатор (ИТ) аппарата устанавливался отдельно от его корпуса внутри заземлённого ограждения установки для уменьшения длины проводников ВН между ИТ и объектом испытаний. Объектом испытаний являлись образцы изоляции с внутренними газовыми дефектами различной формы и размеров. Для контроля принадлежности ЧР к разрядам внутри воздушных дефектов изоляции проводилось сравнение измерений с образцами изоляции, в которых дефектов нет. Образцы изоляции помещались в измерительную ячейку, которая устанавливалась в центр заземлённого металлического бака со сторонами 0,8 м. Без заземлённого металлического бака (клетки Фарадея) регистрировались импульсы подобные ЧР даже при нулевом напряжении на электроде ВН. Одним из источников таких наведённых импульсов оказался блок питания компьютера в системе регистрации ЧР.

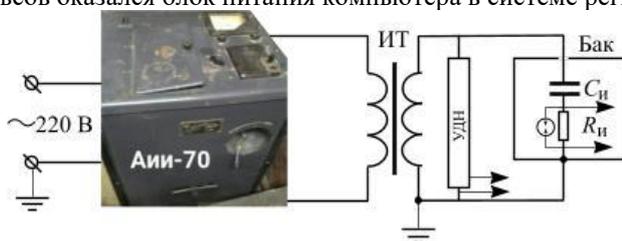


Рис. 1. Схема испытательной установки

Fig. 1. Electrical diagram of the test-system configuration

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Испытательная ячейка являлась, по сути, конденсатором ( $C_n$ ), между обкладками которого помещался изолятор с дефектом внутри. Размеры дефекта цилиндрической формы в направлении вдоль силовых линий электрического поля (высота цилиндра) изменялись от 0,3 до 1,2 мм, а его диаметр от 0,5 до 8 мм. Для контроля чистоты эксперимента имелся образец изоляции без дефекта.

Первоначально ячейка собиралась с твёрдой изоляцией с двумя металлическими круглыми электродами с диаметром 25, 40, 50 и 60 мм. На один электрод через проходной изолятор подавалось ВН, а второй заземлялся через измерительное сопротивление ( $R_n$ ). Наибольшее значение  $R_n$  должно быть таким, чтобы произведение  $C_n \cdot R_n$  было много меньше, чем 5 мс (время подъёма напряжения при частоте 50 Гц. При  $C_n \sim 50$  нФ  $R_n$  должно быть меньше 50 кОм, чтобы напряжение на  $C_n$  совпадало по фазе с напряжением источника, а сдвиг между током и напряжением был  $90^\circ$ . Такая величина  $R_n$  позволяла измерение напряжения возникновения ЧР производить непосредственно по осциллограмме тока (напряжения на  $R_n$ ). Параллельно измерительному сопротивлению  $R_n$  устанавливался быстродействующий искровой разрядник с напряжением срабатывания 90 В для защиты осциллографа от сквозного или поверхностного пробоя изоляции между электродами ячейки. Для снижения вероятности поверхностного пробоя длина пути утечки выбиралась равной 30 см. Напряжение с измерительного сопротивления подавалось по экранированному кабелю на один из входов двухканального цифрового осциллографа TDS 1002B. На другой вход подавалось напряжение с универсального делителя напряжения (УДН). Максимальная частота выборки осциллографа составляла 2 измерения за наносекунду, что в режиме запуска развёртки осциллографа по пришедшему импульсу позволяет записать структуру одиночного ЧР. Перед началом измерений:

- регистрировалось давление и температура в высоковольтной лаборатории;
- выполнялось фотографирование под микроскопом с кратностью увеличения 1500 поверхности внутреннего дефекта;
- измерялось пробивное напряжение трансформаторного масла;
- измерялось напряжение возникновения ЧР в ячейке с образцом изоляции без дефектов.

Для каждого образца изоляции с внутренним дефектом записывалось время начала и окончания воздействия ВН, а после окончания измерений производился контроль состояния поверхности дефекта (фотографирование под микроскопом).

Распределение электрического поля внутри бака с измерительной ячейкой рассчитывалось методом конечных элементов в программе *ComSol-Multiphysics*. Электродные системы в нашей ячейке имели осевую симметрию  $C_\infty$ , что позволяло перейти от расчёта пространственного распределения поля (3D- модель) к расчёту распределения поля в плоскости, проходящей через ось симметрии (2D *axial*- модель). Поскольку передний фронт (лавинная стадия) ЧР длится наносекунды и за это время напряжение промышленной частоты 50 Гц практически не изменяется, то расчёт напряжённости можно проводить в электростатическом приближении (модели) при постоянном напряжении на электродах.

**Результаты и обсуждение (Results and discussion)**

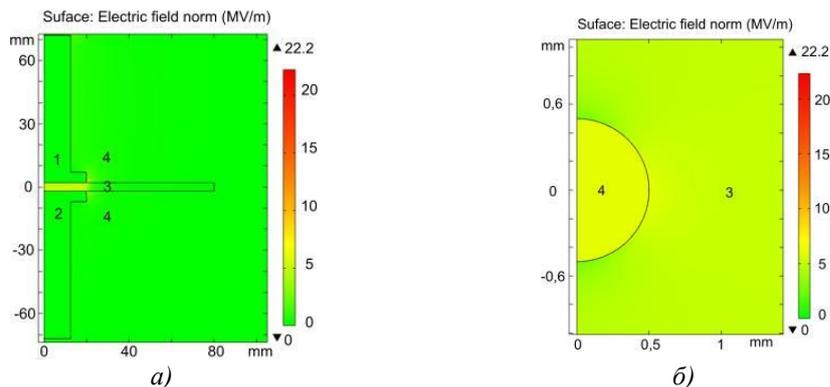
1. Тип ячейки - «сухая» ячейка – измерительная ячейка с электродами цилиндрической формы. Образцы изоляции с дефектом и контрольные образцы изоляции без дефекта вставляются между электродами и плотно прижимаются.

Распределение напряжённости электрического поля в измерительной ячейке с различными электродами круглой формы, рассчитанные в стационарной двухмерной осевой модели программы *ComSol-Multiphysics* 6.

2 представлены на рисунке 2. На верхнем электроде высокого напряжения (ВН) (1) напряжение 20 кВ, а на нижнем  $U=0$ . Из распределения напряжённости электрического поля (ЭП), представленного на рисунке 2а следует, что наибольшая напряжённость наблюдается в промежутке и на краях потенциальных электродов 1 и 2. В других частях заземлённого бокса напряжённость менее 2,5 кВ/мм, т.е. условие самостоятельного разряда выполняется только в области между электродами. В промежутке между электродами 1 и 2 на расстоянии более 5 мм от края напряжённость поля однородна (рис.2а, б). Величина средней напряжённости в изоляции при  $U_{ВН}=20$  кВ и расстоянии между электродами 4 мм равна  $E_{ср}=5$  кВ/мм. Внутри сферического газового дефекта (рис.2в) напряжённость так же однородна, превышает среднюю в 1.25 раза и равна  $E_{max}=6,25$  кВ/мм. Она слабо зависит от размера дефекта, если размер вдоль поля (вдоль вертикальной оси рис.2) меньше половины толщины изоляции [6]. Если использовать данные по ЧР [12], то в таком дефекте ЧР должен произойти при напряжённости  $E_{in}=4,7$  кВ/мм, т.е. при фазовом угле напряжения

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{E_{in}}{E_{max}}\right) = \arcsin(0,752) \sim 49^\circ. \quad (1)$$

Из рисунка 2 видно, что наибольшая напряжённость при различных конфигурациях электродов достигается на границе электрод (1,2) – диэлектрик (3) – воздух (4). Из рис. 2б можно было бы заключить, что напряжённость на краю электрода ВН (22,2 кВ/мм) превышает напряжённость на краю заземлённого электрода (10 кВ/мм). Однако такое различие не соответствует наличию плоскости зеркального отражения у рассматриваемой электродной системы. Из теории симметрии следует, что величины напряжённостей должны быть равны по модулю, а различие вызвано ошибочным моделированием. Действительно, размер сетки на рис.2б у заземлённого электрода был на порядок больше размера сетки у электрода ВН. При уменьшении размера усреднения (сетки) напряжённости становятся равными (рис.2г). Этот пример показывает необходимость проверки правильности дробления сетки в методе конечных элементов. Условие возникновения ЧР вдоль поверхности раздела сред 1-4-3 (2-4-3) [13,14] соответствуют величине напряжённости возникновения ЧР  $E_{in}>2,6$  кВ/мм. При таком условии, ЧР в «сухой» ячейке начнут возникать при фазном угле напряжения по (1)  $\varphi>7^\circ$ . Из этого следует, что коронные и поверхностные ЧР вдоль поверхностей раздела 1-4-3 (2-4-3) будут происходить в том же диапазоне напряжений, что и ЧР от внутренних дефектов изоляции. Поскольку эти разряды имеют случайный характер и подобные характеристики с внутренними ЧР, то разделить их на практике достаточно сложно, а порой и невозможно.



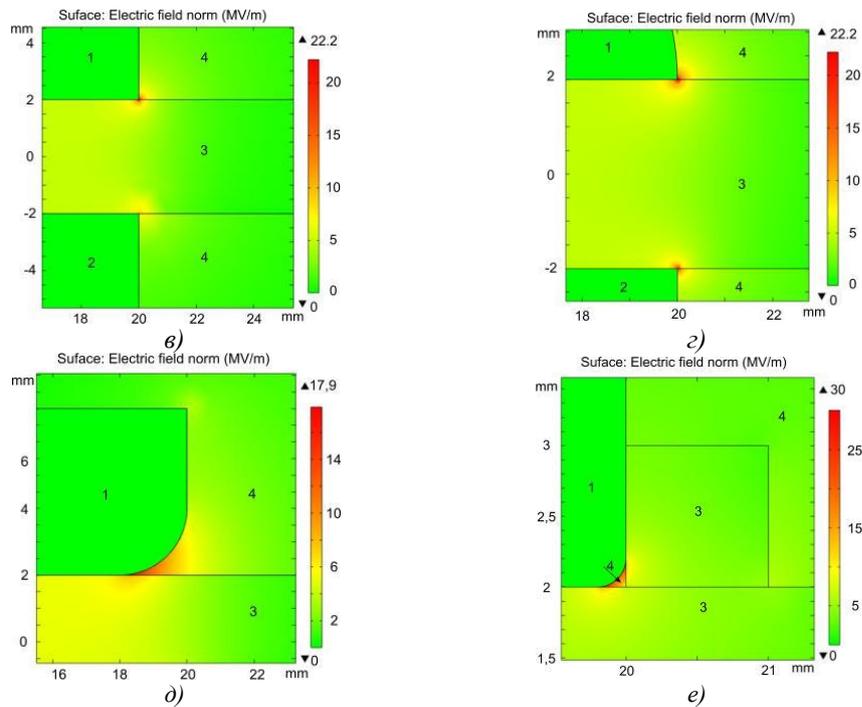


Рис. 2. Напряжённость электрического поля в ячейке: 1 – электрод ВН, 2 – заземлённый электрод, 3 – диэлектрик с дефектом и без него, 4 – воздух

Fig. 2. Electric field in the cell: 1 - electrode HV, 2 - grounded electrode, 3 - dielectric with and without defect, 4 - air

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Типичные осциллограммы напряжений в измерительной ячейке такого типа представлен на рис.3. При повышении напряжения до  $U_{rms}=3\text{kV}$  начинают появляться ЧР в образце изоляции без дефекта (рис.3а). Диэлектрическое кольцо на электродах (рис.2е) снижает напряжённость поля и должно при плотной установке привести к ликвидации поверхностных ЧР. Действительно, интенсивность (число и амплитуда) поверхностных ЧР вначале уменьшается, но после нескольких смен образцов их интенсивность снова возрастает. Это можно объяснить тем, что при неплотном контакте в тройной точке (окружности), где пересекаются границы разделов металл-воздух изолятор, образуются небольшие воздушные каверны типа рис.3е, в которых напряжённость даже выше, чем на границе раздела.

Такая же по порядку величины напряжённость возникает при наличии микроскопических зазоров между электродами и диэлектриком, возникающими при их не плотном прилегании. Нанесение на поверхности контакта трансформаторного масла приводит к его пробое и обугливаю.

При измерении ЧР в «сухой» ячейки регистрировалась ЧР как от образцов с внутренними объёмными газовыми дефектами (включениями), так и на контрольных образцах. Типичная картина наблюдаемых ЧР представлена на рис.3. Выделить сигнал ЧР от внутреннего дефекта (рис.3в) от поверхностных ЧР практически не представляется возможным даже при наличии контрольной осциллограммы образца без дефекта (рис.3б).

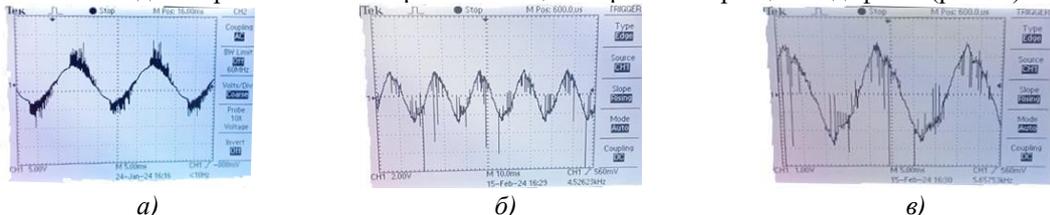


Рис. 3. Осциллограммы ЧР: а) без дефекта (электроды рис.2в), электроды рис.2 (с кольцом без дефекта б) и с дефектом в)

Fig. 3. PD oscillograms: а) without defect (electrodes of Fig. 2b), electrodes of Fig. 2 (with ring) without defect б) and with defect в)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

2. Тип ячейки – масляная ячейка – стандартная ячейка для измерения пробивного напряжения трансформаторного масла<sup>1</sup> типа Т-1500Ус рабочим диапазоном температуры

<sup>1</sup> ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. // М.: ФГУП «Стандартинформ», 2008.

от +135°C до -45°C. Если в качестве электродной системы использовать эту ячейку, то картина распределения электрического поля существенно изменяется. На рис.4а показано распределения напряжённости в электродной системе масляной ячейки со вставленным образцом состоящий из твердой ПЭТ изоляции, имеющим внутренний газовый дефект.

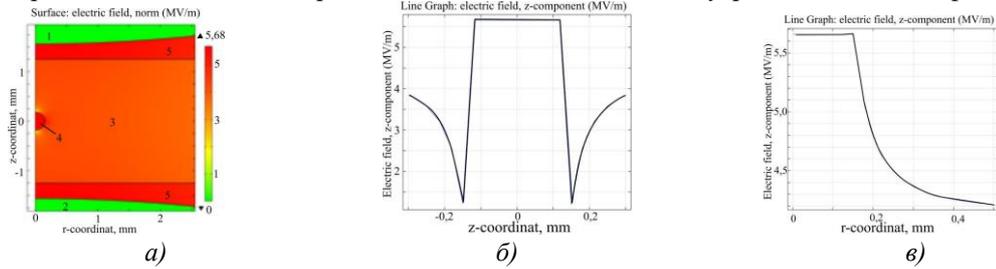


Рис.4. Электрическое поле в масляной ячейке с образцом диэлектрика с дефектом: а)  $rz$  – плоскость, б)  $E_z=f(z)$  при  $r=0$ ; в)  $E_z=f(r)$  при  $z=0$ ; цифрами обозначены: 1, 2 высоковольтный и заземлённый электроды; 3-диэлектрик; 4-воздушный дефект; 5 – трансформаторное масло

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Воздушное включение только одно. Это дефект в изоляции. Электрическое поле в дефекте однородно, что видно из расчёта  $E_z$  компоненты как вдоль оси  $z$  (рис.4б), так и вдоль оси  $r$  (рис.4в). Распределение электрического поля на рис.4 рассчитано при напряжении  $U_{rms}=8$  кВ на высоковольтном электроде 1. Наибольшая напряжённость получается в воздушном включении в изоляцию и равно  $E_{max}=5,68$  кВ/мм. Для дефекта размером 0,3 мм вдоль оси  $Z$  напряжённость возникновения ЧР по данным работы [12] равна  $R_{in}=5,8$  кВ/мм, т.е. при данном напряжении ЧР должен наблюдаться вблизи амплитудного значения напряжения при фазном угле  $90^\circ$  на положительной полуволне напряжения и вблизи угла  $270^\circ$  на отрицательной полуволне. На рис.5. представлены осциллограммы образца без дефекта (рис.5а) и с дефектом 0,3 мм вдоль поля (рис.5б) со среднеквадратичным напряжением между электродами  $U_{rms}=24$  кВ, что соответствует максимальной напряжённости в масляном зазоре 17 кВ/мм. Никаких ЧР разрядов в системе с диэлектриком без дефекта (рис.5а) не наблюдается и при таких напряжённостях. Обычно ЧР в испытательной ячейке с маслом начинаются за несколько кВ до сквозного пробоя. Напряжённость 17 кВ/мм получается в ячейке без диэлектрика при напряжении между электродами  $17 \text{ кВ/мм} \cdot 2,5 \text{ мм} = 42,5 \text{ кВ}$ , что является низкой электрической прочностью масла. Перед началом измерений ЧР в газовых порах диэлектрика проводились два типа измерений: а) измерение пробивного напряжения в ячейке без вставленного диэлектрика и выбиралось трансформаторное масло с электрической прочностью не ниже 70 кВ; б) вставлялась диэлектрическая пластина без дефекта, повышалось напряжение до  $\sim 50$  кВ и акустическим датчиком контролировалось отсутствие ЧР. Действуя по такой методике можно быть уверенным, что все ЧР, которые регистрируются в установке рис.1, принадлежат к внутренним дефектам изоляции, вставленной между электродами стандартной измерительной ячейки.



Рис.5. Осциллограммы ЧР в масляной ячейке при  $U_{rms}=24$  кВ: а) контрольный образец изоляции без дефекта; б) изоляция с воздушным дефектом 0,3 мм вдоль поля

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 5б спектр ЧР состоит только из 2 ЧР по одному на период. Делались различные снимки экрана с 5 периодами и 3 периодами синусоиды переменного напряжения промышленной частоты. Число ЧР, возникающих на 1 периоде синусоиды,

равнялось 0, 1 или 2. У всех ЧР было одинаковый фазовый угол на положительной полувольтне, который был меньше на  $180^\circ$  фазового угла на отрицательной полувольтне напряжения. Это свидетельствует о том, что все ЧР происходят при одинаковой по модулю напряжённости ЭП. Если делается снимок экрана с масштабом развёртки 10 мс/дел на временной интервал 100 мс приходится 2500 выборок, т.е. измерения напряжения происходят через интервал 40 мкс. При такой частоте выборки много ЧР просто не фиксируются, поскольку длительность фронта одиночного ЧР имеет порядок нескольких нс, а время полуспада напряжения до сотни нс. Точность измерения фазового угла ЧР (напряжения возникновения) по такой методике составляют несколько градусов, что позволяет утверждать, что в исследованном образце после каждого ЧР происходит полная нейтрализация остаточного заряда каждую половину периода. Остаточного заряда на стенках воздушной каверны после  $10^7$  ЧР не образуется, а заметного деградации поверхности дефекта через 30 часов после приложения напряжения под микроскопом не наблюдалось.

#### **Заключение (Conclusions)**

Создана экспериментальная установка с измерительной ячейкой, в которой могут быть исследованы ЧР от внутренних газовых дефектов в изоляции при отсутствии коронных и поверхностных разрядов. Установлено, что ЧР в газовых кавернах изоляции происходят дважды за период синусоиды промышленной частоты 50 Гц при постоянных по модулю напряжениях. Проявления остаточных зарядов от предыдущих ЧР не обнаружено. Повреждения поверхности каверны после 30 часов приложения напряжения, создающего напряжённость электрического поля, превышающую напряжённость возникновения частичных разрядов, не наблюдалось.

#### **Литература**

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования // Новосибирск: Наука. - 2007. – 155с.
2. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. // Екатеринбург: УрГУПС, 2011. — 370 с. — ISBN: 978-5-94614-177-2.
3. Taylor N. A literature review: The nature of partial discharges in stator insulation. // ETK, KTH. 2008. P.34.
4. Kaziz S., Said M.H., Imburgia A., Maamer M, Flandre D., Romano P., Tounsi F. Radiometric Partial Discharge Detection: A Review. // *Energies* 2023, 16, 1978.
5. Zhang X., Pang B., Liu Y., Liu S., Xu P., Li Y., Liu Y., Qi L., Hie Q. Review on detection and analysis of partial discharge along power cables. // *Energies*, 2021, 14 (22), 7692,
6. Raziq H., Batoola M., Nawaz F., Akgul A., Afzal F., Hassani M.K. A review on analysis and modeling of electrical machine insulation system. // *Electrical & Electronic Engineering cogent engineering*, 2024, V.11, 2400614.
7. Ба Бораик А. М., Усачев А.Е., Кубарев А. Ю., Ильдарханов Р.Г. Новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов. // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2018. Т.20. № 1-2. С. 41-53.
8. Baboraik A.M., Usachev A.E. New model of explanation for phase angle pattern of online partial discharge measurement in winding insulation of turbine generator. // *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, V.72 (2021), pp.66–77.
9. Kubarev A.Yu., Usachov A.E., Mikhaylova E.V. Modeling of Partial Discharge Waveforms in the Generalized Model of Power Transformer Insulation // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446437; ISBN Information: Electronic ISBN:978-1-7281-4587-7; USB ISBN:978-1-5386-1797-7; Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-7281-4588-4
10. Kubarev A.Yu., Usachov A. E., Paramonov M.A. Analysis of Power Transformers Monitoring Systems // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553850 Electronic ISBN:979-8-3503-9501-3 USB ISBN:979-8-3503-9500-6 Print on Demand (PoD) ISBN:979-8-3503-9502-0
11. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Modeling of partial discharges from a spherical cavity within a dielectric material under variable frequency electric fields // *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on. – IEEE, 2008. – С. 447-450.
12. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Effect of surface charge distribution on the electric field in a void due to partial discharges // *Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, Proceedings of 2011 International Conference on. – IEEE, 2011. – С. 245-248.
13. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю.

Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле. // ЖТФ, 2006, т.76, в.3., с.38-43.

14. Месяц Г. А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах. // УФН. Обзоры актуальных проблем 2006. Т.176, №10 с.1069-1091.

15. Luo B., Wang J., Dai D., Jia L., Li., Wang T. Partial Discharge Simulation of Air Gap Defects in Oil-Paper Insulation Paperboard of Converter Transformer under Different Ratios of AC–DC Combined Voltage // Energies, 2021, 14, 6995

16. Киншт Н.В., Борисов Б.Д., Петрунько Н.Н. Вопросы оценки множественных частичных разрядов в высоковольтном оборудовании. // Электроэнергия. Передача и распределение, 2019 № 2(53).

#### Авторы публикации

**Ньетерейе Фредерик**–аспирант кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», [nyetereyefrederic@gmail.com](mailto:nyetereyefrederic@gmail.com), Казанский государственный энергетический университет.

**Усачев Александр Евгеньевич**– д.ф.-м.н. профессор, профессор кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», [aleksandr\\_usachev@rambler.ru](mailto:aleksandr_usachev@rambler.ru). Казанский государственный энергетический университет.

**Бобоев Шухрат Абдусаломович**– ассистент кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», [shuhrrar1004@mail.ru](mailto:shuhrrar1004@mail.ru) Казанский государственный энергетический университет.

**Кубарев Артём Юрьевич** –кан. техн. наук. доцент кафедры «Электрические станции им. Шибанова В.К.», [artemkubarev@yandex.ru](mailto:artemkubarev@yandex.ru). Казанский государственный энергетический университет.

#### References

1. Vdoviko, V.P. Partial discharges in diagnostics of the high-voltage equipment (in Russian) // Novosibirsk: Nauka. - 2007. - 155с.
2. Rusov, V.A. Measurement of the partial discharges in the insulation of the high-voltage equipment. // Yekaterinburg: UrGUPS, 2011. - 370 с. - ISBN: 978-5-94614-177-2.
3. Taylor N. A literature review: The nature of partial discharges in stator insulation. // ETK, KTH. 2008. P.34.
4. Kaziz S., Said M.H., Imburgia A., Maamer M, Flandre D., Romano P., Tounsi F. Radiometric Partial Discharge Detection: A Review. // Energies 2023, 16, 1978.
5. Zhang X., Pang B., Liu Y., Liu S., Xu P., Li Y., Liu Y., Qi L., Hie Q. Review on detection and analysis of partial discharge along power cables. // Energies, 2021, 14 (22), 7692,
6. Raziq H., Batoola M., Nawaz F., Akgul A., Afzal F., Hassani M.K.. A review on analysis and modeling of electrical machine insulation system. // Electrical & Electronic Engineering, 2024, V.11, 2400614.
7. Ba Boraik A.M., Usachev A.E., Kubarev A.Yu., Ildarkhanov R.G. New methodology for determination of the sizes and positions of the defects in the insulation of the stator windings of the turbogenerators at the measurements of the partial discharges in them. // Izvestiya Vuzov. Problems of power engineering. 2018. T.20. № 1-2. С. 41-53.
8. Baboraik A.M., Usachev A.E.. New model of explanation for phase angle pattern of online partial discharge measurement in winding insulation of turbine generator. // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, V.72 (2021), pp.66-77.
9. Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Mikhailova E.V. Modeling of partial discharge waveforms in a generalized model of power transformer insulation // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446437; ISBN Information: Electronic ISBN:978-1-7281-4587-7; USB ISBN:978-1-5386-1797-7; Print on Demand (PoD) ISBN:978-1-7281-4588-4
10. Kubarev A.Yu., Usachev A.E., Paramonov M.A. Analysis of power transformer monitoring systems // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553850 Electronic ISBN:979-8-3503-9501-3 USB ISBN:979-8-3503-9500-6 Print on Demand (PoD) ISBN:979-8-3503-9502-0
11. Ilias H. A., Chen G., Lewin P. L. Modeling of partial discharges from a spherical cavity inside a dielectric material in electric fields of variable frequency // Electrical Insulation and

Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual reporting conference. - IEEE, 2008. - С. 447-450.

12. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Effect of surface charge distribution on the electric field in a void due to partial discharges // Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of the 2011 International Conference on. - IEEE, 2011. - С. 245-248.

13. Alexandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Lomteva A.Yu. Ionization of air in near-critical electric field. // ZhTF, 2006, vol. 76, v.3, p.38-43.

14. Mesyats G. A. Similarity laws in pulsed gas discharges. // UVN. Reviews of Actual Problems 2006. Vol.176, No.10, pp.1069-1091.

15. Luo B., Wang J., Dai D., Jia L., Li., Wang T. Partial Discharge Simulation of Air Gap Defects in Oil-Paper Insulation Paperboard of Converter Transformer under Different Ratios of AC-DC Combined Voltage // Energies, 2021, 14, 6995.

16. Kinct, N.V.; Borisov, B.D.; Petrunko, N.N. Assessment questions of the multiple partial discharges in the high-voltage equipment. // Electricity. Transmission and Distribution, 2019 № 2(53).

#### **Authors of the publication**

*Nyetereye Frederic* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Alexander E. Usachev* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Shuhrat A. Boboev* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Artyom Y. Kubarev* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.*

**Получено** **29.05.2025 г.**

**Отредактировано** **01.06.2025 г.**

**Принято** **10.06.2025 г.**

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-23-37

## КЛАССИФИКАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЧАСТНОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Капанский А.А., Павлов В.В., Зализный Д.И., Веремеева Д.И.

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь),  
г. Гомель, Республика Беларусь  
*kapanski@mail.ru*

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Рост электропотребления в частном жилом секторе, связанный с увеличением энергоиспользования в том числе на обогрев зданий, приводит к возрастанию нагрузок на линии электропередачи 0,4 кВ. Традиционные типовые графики нагрузок не всегда отражают современные условия и особенности потребления, что создаёт риски неверной оценки пропускной способности электрической сети и требует более точного моделирования режимов работы электросетей. **ЦЕЛЬ.** Разработать подходы к классификации потребителей и выявить статистически обоснованные закономерности электропотребления в частной жилой застройке для последующего расчёта режимов работы в электрических сетях. **МЕТОДЫ.** Для анализа использовались данные получасового электропотребления 42 частных домов, собранные из АСКУЭ. Проведена очистка от пропусков и выбросов методом трёх сигм, а также формирование тепловых карт для выявления нерепрезентативных потребителей. Статистическая значимость различий установлена посредством дисперсионного анализа (ANOVA) и теста Тьюки. На основе медианных значений потребления сформированы группы с низким и высоким уровнем энергоиспользования. При визуализации и обработке данных применялись MS Excel, Python (библиотеки Pandas, NumPy, SciPy), а также пакет Statistica. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Анализ подтвердил наличие статистически значимых различий в электропотреблении между большинством домов ( $F=2065,4$ ,  $p<0,001$ ). Тест Тьюки показал, что внутри каждой группы дома характеризуются относительно стабильными значениями энергопотребления, однако в межгрупповом сравнении расход электроэнергии существенно варьируется. По результатам исследования выделены две группы: с «низким» и «высоким» уровнем потребления. Для группы с высоким уровнем выявлены ярко выраженные вечерние пики (18:00–22:00), тогда как в группе с низким потреблением профиль нагрузки более равномерен. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Применение методов статистического анализа электропотребления позволило упростить классификацию домов до двух основных групп и сформировать типовые профили потребления. Эти результаты интегрированы в программное обеспечение LineCapacity, что облегчает расчёт режимов работы электросетей и способствует снижению неверной оценки запаса передаваемой мощности. Планируется перспективное направление исследований, сосредоточенное на расширении набора данных по электропотреблению жилых домов. Это позволит учитывать влияние сезонных факторов, а также разработать механизмы имитационного моделирования энергоиспользования различных групп потребителей.

**Ключевые слова:** *электропотребление; дисперсионный анализ (ANOVA); статистический анализ; классификация потребителей; частный жилой фонд; структурные различия потребителей; статистическое моделирование; методы анализа энергопотребления; идентификация групп потребителей.*

**Для цитирования:** Капанский А.А., Павлов В.В., Зализный Д.И., Веремеева Д.И. Классификация и исследование закономерностей электропотребления частной жилой застройки на основе методов статистического анализа // Известия высших учебных

## CLASSIFICATION OF CONSUMERS AND ANALYSIS OF ELECTRICITY CONSUMPTION PATTERNS BASED ON VARIANCE ANALYSIS METHODS

Kapansky A.A., Pavlov V.V., Zalizny D.I., Veremeeva D.I.

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus

kapanski@mail.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* The increasing electricity consumption in the private residential sector, driven in part by the growing use of electric heating, is leading to higher loads on 0.4 kV power transmission lines. Traditional standardized load profiles do not always reflect modern consumption patterns and conditions, which creates risks of inaccurate assessments of the electrical grid's capacity and necessitates more precise modeling of grid operating conditions. *PURPOSE.* To develop approaches for classifying consumers and identifying statistically significant patterns in electricity consumption in private residential areas for subsequent calculation of grid operating conditions. *METHODS.* The analysis was based on half-hourly electricity consumption data from 42 private houses, collected via an Automated Meter Reading and Management System (AMRMS). The data was cleaned using the three-sigma rule to remove gaps and outliers, and heat maps were used to identify non-representative consumers. The statistical significance of differences was determined using analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test. Based on median consumption values, consumer groups were formed (low and high electricity consumption). Data processing and visualization were performed using MS Excel, Python (Pandas, NumPy, SciPy libraries), and the Statistica software package. *RESULTS.* The analysis confirmed statistically significant differences in electricity consumption between most of the houses ( $F = 2065.4$ ,  $p < 0.001$ ). Tukey's test showed that within each group, homes exhibited relatively stable energy consumption values, while intergroup comparisons revealed substantial variations in electricity usage. As a result of the study, two consumer types were identified: "low" and "high" consumption groups. The high-consumption group exhibited distinct evening peaks (18:00–22:00), whereas the low-consumption group had a more evenly distributed load profile. *CONCLUSION.* The application of statistical analysis methods to electricity consumption data enabled the simplification of household classification into two main groups and the development of typical consumption profiles. These results were integrated into the LineCapacity software, facilitating grid operation calculations and reducing the risk of misjudging the available power transmission capacity. A promising research direction is planned, focusing on expanding the dataset on residential electricity consumption. This will allow for the consideration of seasonal factors and the development of simulation modeling mechanisms for various consumer groups.

**Keywords:** *electricity consumption; analysis of variance (ANOVA); statistical analysis; consumer classification; private housing stock; structural differences in consumers; statistical modeling; methods of energy consumption analysis; identification of consumer groups.*

**For citation:** Kapansky A.A., Pavlov V.V., Zalizny D.I., Veremeeva D.I. Classification of consumers and analysis of electricity consumption patterns based on variance analysis methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 23-37. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-23-37.

### **Введение (Introduction)**

Одним из ключевых аспектов эффективного управления энергоснабжением жилых районов является прогнозирование пропускной способности электрических сетей, что приобретает особую актуальность в контексте непрерывного развития электрификации энергосистем России и Беларуси [1]. Для последней это особенно важно в условиях, когда энергетический сектор претерпевает значительные изменения, связанные со строительством атомной электростанции. Это приводит к увеличению электрогенерирующих мощностей в системе и требует наращивания потребления электроэнергии в различных отраслях экономики, в том числе и в частном жилом секторе.

Однако такая стратегия развития энергетики из-за увеличения нагрузки на низковольтную инфраструктуру электроснабжения сопровождается определенными ограничениями. Линии электропередач часто спроектированы и построены в соответствии со стандартами и потребностями, существовавшими на момент их создания. Это означает, что пропускная способность ЛЭП может не соответствовать новым требованиям, вытекающим из увеличения общей нагрузки и изменения характера потребления, к примеру, связанного с установкой индивидуальной системы электрообогрева. Кроме того, важно учитывать физический износ и устаревание инфраструктуры, что также может влиять на пропускную способность электрической сети.

Понимание особенностей электропотребления в частной жилой застройке позволяет выделить ключевые характеристики для классификации потребителей и использовать эти данные при планировании режимов работы электрических сетей, снижая тем самым риски перегрузок и аварий. Этому способствуют современные методы статистического анализа, в том числе имитационное моделирование электрических нагрузок, которое не только помогает оценить текущую загрузку сети, но и предсказать будущие изменения. Комплексное изучение закономерностей электропотребления позволяет выявить общие тенденции и сгруппировать потребителей на основе схожих статистических свойств. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить количество разнообразных форм типовых графиков электропотребления и использовать в анализе усреднённые групповые свойства, что значительно упрощает моделирование энергетических процессов. В этой связи *цель исследования* заключается в разработке подходов к классификации потребителей частной жилой застройки и выявлению закономерностей электропотребления на основе статистического анализа данных для расчета режимов работы и оценки пропускной способности электрических сетей в условиях наращивания электропотребления.

Данное исследование выполнено в рамках НИР «Разработка методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда». *Практическая значимость* исследования заключается в интеграции результатов в программное обеспечение LineCapacity, разработанное в ходе выполнения научно-исследовательской работы. Это позволило упростить классификацию потребителей до двух уровней: с комплексным использованием электроэнергии (КИЭ) и без КИЭ. Такой подход значительно сократил время на создание схемы электрической сети, улучшив эффективность обработки исходных данных потребителей на основе типовых свойств. *Научная значимость* исследования состоит в разработке методов сравнения схожести динамики электропотребления жилых домов и оценки их статистических различий. Основой работы являются методы корреляционного и дисперсионного анализа, критерий Тьюки и другие статистические инструменты. Полученные результаты демонстрируют возможности объединения данных по целевым группам, что упрощает анализ и способствует более точному расчету режимов работы электрических сетей в частном жилом фонде.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В последние годы, с появлением больших объёмов данных, наблюдается рост исследований, связанных с изучением закономерностей электропотребления в различных отраслях экономики. Научные публикации также охватывают бытовую сферу, где оптимизация электропотребления становится всё более актуальной, особенно в условиях роста использования систем электронагрева и кондиционирования воздуха, что ведёт к изменению структуры нагрузки жилого фонда. Важность таких исследований научным сообществом очевидна и в общем случае направлена на разработку механизмов планирования развития электрических сетей, что напрямую влияет на эффективность энергоснабжения. Далее рассматриваются основные направления в научной литературе, которые послужили отправной точкой для разработки методов статистического анализа электропотребления в частной жилой застройке в рамках данной публикации.

Одним из ключевых направлений является использование статистических методов для моделирования и прогнозирования графиков нагрузки. В работе [2] (*Trunova I. et al.*) предложены методы для расчёта дневных и вечерних максимумов нагрузки на основе алгоритма, который суммирует типовые графики с учетом вероятностных свойств электропотребления. Такое суммирование, по мнению авторов, позволяет улучшить точность прогноза пиков мощности по сравнению с традиционными методами расчета. Эти результаты важны для планирования и анализа предельных нагрузок в жилых и промышленных зонах. Подобные методы будут адаптированы в рамках нашего

исследования для улучшения предсказания нагрузки на линии электропередачи 0,4 кВ при выделении типовых профилей электропотребления.

Дополнительно исследование [3] (*Доброго К. В.*) делает акцент на более детализированном подходе к моделированию нагрузки, используя метод Монте-Карло и различные математические модели, которые позволяют учитывать не только временные, но и структурные изменения в потреблении электроэнергии. Методика, предложенная в [3], может быть полезной для более точного распределения нагрузки среди различных типов потребителей, таких как многоквартирные застройки или частные жилые дома, с учётом их индивидуальных особенностей потребления. Предложенный автором метод можно эффективно адаптировать для моделирования изменений нагрузки при росте электропотребления в частной застройке, учитывая актуальные особенности энергопотребления.

Стоит отметить, что приводимые в справочной литературе типовые графики нагрузок, основанные на исторических данных и стандартах, часто не соответствуют актуальному состоянию электропотребления, что подтверждается исследованиями, такими как [4] (*Демиденко А. С., Шведов Г. В.*), [5] (*Солуянов Ю. И. и др.*) и [6] (*Надтока И. И. и др.*). В статье [4] указывают на существенное несоответствие старых графиков с современным электропотреблением в многоквартирных домах, что обусловлено ростом числа электроприборов и изменениями в образе жизни потребителей. В свою очередь, в [5] при проведении анализа фактических электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы были получены результаты, что нормативные значения удельных электрических нагрузок, указанные в стандарте, превышены более, чем в 2 раза. С целью корректировки удельных электрических нагрузок квартир в нормативных документах, было проведено исследование [6] электропотребления многоквартирных домов с электроплитами в Московском регионе за период с 2012 по 2021 г. Результаты анализа показали относительную устойчивость средних и максимальных удельных нагрузок на квартиру и коэффициентов, характеризующих форму графиков нагрузки. Приведенные обзоры играют ключевую роль в исследовании, так как они подчёркивают важность анализа существующих закономерностей электрических нагрузок на актуальных данных. Это, в свою очередь, способствует разработке более точных и адаптированных подходов к классификации электропотребления в частной жилой застройке.

На электропотребление влияет множество факторов, один из таких – климатический. Так в статье [7] (*Капанский А. А.*) была проверена гипотеза, согласно которой изменение температуры воздуха и осадки оказывают воздействие на водопотребление и, следовательно, на энергозатраты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что есть зависимость между ростом энергопотребления в связи с увеличением спроса на воду и повышением температуры наружного воздуха. При отрицательных температурах явной связи не наблюдалось, зато была выявлена корреляция между температурой и расходом электроэнергии, это объясняется дополнительными затратами на поддержание системы водоснабжения в условиях холодного климата.

Другими важными факторами является учёт социально-экономических характеристик и поведение потребителей. В работе [8] (*McLoughlin F. et al.*) рассматривается влияние характеристик жилья и жильцов Ирландии на поведение потребления электроэнергии путем анализа большого объема данных (более 3941 жилых домов), собранных в ходе энергетического обследования после подключения интеллектуальных счетчиков. В исследовании авторы использовали модель множественной линейной регрессии, где в качестве факторов рассматривался тип жилья, количество спален, возраст потребителей, состав домохозяйства, социальный класс, тип нагрева воды и приготовления пищи. Как показали результаты исследования все эти характеристики оказали существенное влияние на общее потребление электроэнергии в доме.

Аналогичные исследования отражены и в статье [9] (*Laicane I. et al.*), где приводятся результаты пилотного проекта JSC «Latvenergo», в котором 500 домохозяйств были оснащены умными электросчётчиками (целевая группа), а ещё 500 остались без такого оснащения (контрольная группа). В рамках исследования проверялась гипотеза о том, что основной фактор, влияющий на потребление, – это тип отопления домохозяйства, что стало основанием для классификации по следующим категориям: центральное отопление, отопление природным газом, котел на твердом топливе, электрическое отопление, тепловой насос и др. Для оценки факторов использовался метод множественной линейной регрессии. По результатам исследования было установлено, что

ключевыми факторами потребления электроэнергии являются общее количество электроприборов в домохозяйстве и общая площадь жилого дома.

Подобный подход был использован в работе [10] (*Sütterlin B. et al.*), где предложена сегментация потребителей на основе не только их поведенческих характеристик, но и отношения к энергосбережению. Важно, что такие исследования показывают, что поведение потребителей не всегда можно предсказать только с учётом технических характеристик обустройства дома, и многие факторы, такие как мотивация и социальная осведомлённость, могут оказать решающее влияние на потребление электроэнергии, что отражается в работе [11] (*L. Poznaka et al.*). Эти результаты исследований становятся особенно актуальным в задачах оптимизации электроэнергии при учёте потребителей, оснащённых современными энергоэффективными технологиями или системой умного дома.

В последние годы вопросу оптимизации электропотребления отводится особое внимание [12, 13, 14, 15, 16]. В работах [17] (*Усова А. С., Хмелевой С. В.*), [18] (*Yahia Z., Pradhan A.*) и [19] (*Chen S. et al.*) рассматриваются подходы к оптимизации использования бытовых приборов за счет изменения тарифов оплаты за электроэнергию. В [17] применяют вид генетического алгоритма для оптимизации потребления электроэнергии многоквартирного дома с учётом ограничений по максимальному пиковому энергопотреблению. В [18] задача планирования нагрузки решается с учетом стимулов и неудобств потребителя. Метод планирования нагрузки в жилых помещениях в режиме реального времени предлагается и в [19], в этой работе разрабатывается персонализированная оптимальная стратегия эксплуатации бытовой техники. Эти исследования показывают, что управление нагрузкой может быть осуществлено не только за счёт трансформации поведенческих свойств электроиспользования, но и с помощью интеграции динамических тарифов, что способствует снижению пиковых нагрузок в энергетической системе в целом. Данные результаты имеют ключевое значение для планирования развития электрических сетей, так как позволяют разрабатывать стратегии управления пиковыми нагрузками. Однако эффективность таких методов напрямую зависит от точности классификации потребителей, что делает важным применение статистических методов анализа для выявления целевых групп с различными характеристиками потребления.

Таким образом, классификация электропотребления жилого фонда является важным аспектом современных научных исследований, направленных на повышение энергоэффективности и оптимизацию электрических сетей. В работах [20] (*Rafiq H. et al.*) и [21] (*Ramnath G. S. et al.*) предложены методы кластеризации потребителей на основе анализа их профилей нагрузки. Эти методы позволяют эффективно разделять потребителей на группы с похожими характеристиками потребления и применить к ним различные модели анализа данных. В [20] используя данные о системе кондиционирования, тип жилья, занятости жильцов методом  $k$ -средних сгруппировали потребителей. Использование метода самоорганизующихся карт Кохонена (нейронная сеть с обучением без учителя) и метода  $k$ -средних в [21] оказалось весьма успешным для кластеризации 225 домохозяйств. В результате авторами предложена классификация по уровню потребления: низкое, среднее, высокое и сверхвысокое, как показало исследование эта классификация четко зависит от социального класса, договорной мощности, количества комнат, числа жителей и типа тарифа за электроэнергию. В исследовании [22] (*C. Chen et al.*) была проведена классификация методом анкетирования по критериям количества поколений, живущих вместе, что характерно для сельской провинции в Китае, и их времени нахождения дома. Затем был проведен анализ влияния факторов на энергопотребление, таких как естественная освещенность, соотношение площади окна к площади стены, тип отопления и др. Результаты исследования показали, что не все факторы имеют значительное влияние и для разных классификационных моделей влияющими факторами были не одни и те же.

Совокупность рассмотренных исследований демонстрирует высокий уровень актуальности и значительный интерес к изучению свойств электропотребления жилого сектора. Однако вопросы, связанные с анализом электропотребления в частной жилой застройке, остаются недостаточно раскрытыми, особенно на территориях Беларуси и России. Дефицит системных исследований в этом направлении подчёркивает необходимость дополнительного изучения, что делает проводимое исследование особенно актуальным. На основе проведенного обзора литературы и выявленных особенностей электропотребления сформулированы следующие задачи исследования:

1. Анализ данных электропотребления частных жилых домов для выявления

характерных особенностей потребления.

2. Определение ключевых метрик, включая минимальные, максимальные и средние нагрузки жилого дома, а также среднеквадратическое отклонение потребления.

3. Выявление различий в электропотреблении для классификации потребителей и улучшения управления нагрузками.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

**Обработка и подготовка статистических данных**

Объектом изучения выбрана типовая деревня Жлобинского района Гомельской области Республики Беларусь. В исследовании использованы данные получасового электропотребления 42 частных домов за период с августа по октябрь 2023 года. Эти данные были предоставлены энергоснабжающей организацией и собраны с автоматизированной системы АСКУЭ, что обеспечивало их высокую точность и достоверность. В общей сложности массив данных включал более 107 725 записей и создал значительную информационную базу для выявления закономерностей электропотребления в жилом секторе.

Вместе с тем, несмотря на высокую точность данных в ходе формирования статистики наблюдались пропуски значений, а также дома, имеющие периоды с отсутствующим электропотреблением. Для выделения таких потребителей получасовые данные приводились к суточному уровню агрегации и представлялись в виде тепловой карты, где электропотребление визуализировалось по периодам и домам в виде цветового градиента: от красного (низкое потребление) до зеленого (высокие значения потребления). Этот подход позволил быстро выявить нерепрезентативных потребителей, представляющих искажение общей картины электропотребления, и убрать их из дальнейшего анализа. В соответствии с заданными ограничениями из исходной статистики исключилось 12 жилых домов, где электропотребление преимущественно отсутствовало. Фрагмент информационной базы статистических данных электропотребления в широком формате представления представлен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Фрагмент широкого формата временного статистического ряда электропотребления

*A fragment of a wide format of a time statistical series of power consumption*

Дата-время	дом 15	...	дом 98
14-08-2023- 00:30:00	0,07	...	0,03
14-08-2023- 01:00:00	0,14	...	0,04
...	...	...	...
07-10-2023- 23:00:00	0,12	...	0,04
07-10-2023- 23:30:00	0,06	...	0,07

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

После очистки нулевых статистических данных оставалось решить проблему наличия пропусков получасовых значений в оставшихся домах. Эти пропуски могли исказить результаты анализа, поэтому перед переходом к дальнейшим этапам исследования реализована операция по заполнению отсутствующих значений. Для этой цели использован метод подстановки, основанный на замене отсутствующих элементов в массиве данными из схожих временных периодов, где они присутствуют. Этот метод предполагает, что потребление электроэнергии в аналогичные часы разных дней для одного и того же дома остается относительно стабильным, и поэтому данные одного временного среза могут служить заменой для другого. Такой подход позволил сохранить структурную целостность данных и подготовить их к последующему этапу исследования, минимизируя искажения, которые могут возникнуть из-за неполноты значений.

Далее была проведена очистка временных рядов электропотребления от нетипичных данных. Удаление выбросов, способных существенно исказить результаты исследования, являлось важной частью обеспечения точности и надежности статистического анализа. В качестве метода цензурирования данных использовалось правило трёх сигм, которое применяется при анализе данных, соответствующих нормальному распределению [23]. Наши исследования подтвердили, что электропотребление жилого фонда преимущественно подчиняется этому распределению, что делает данный метод обоснованным. Применение данного подхода позволило минимизировать влияние экстремальных значений и повысить достоверность результатов. На рисунке 1 демонстрируется пример наблюдавшихся выбросов в данных для дома №15.

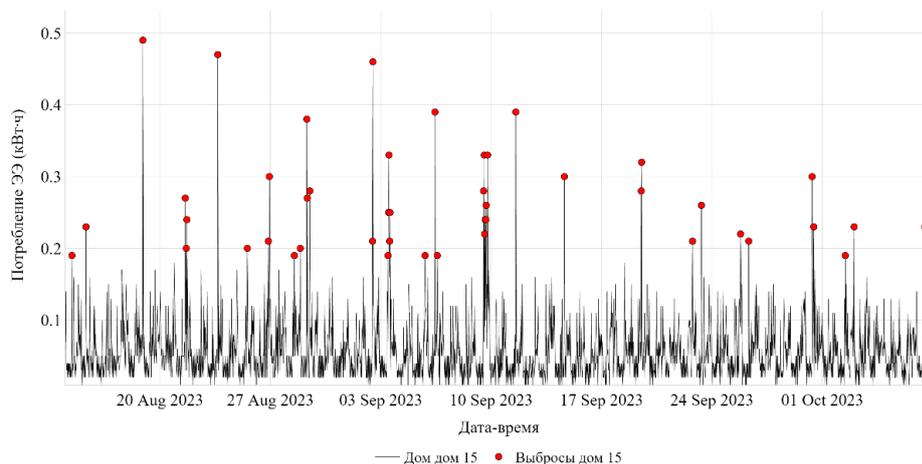


Рис. 1. Исключение выбросов методом трех сигм для дома №15 *Fig. 1. Elimination of emissions using the three sigma method for house No. 15*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

### Инструменты и методы анализа данных

В ходе исследования применялся широкий спектр статистических инструментов, обеспечивающих комплексную обработку и анализ данных электропотребления. Для формирования массива данных, предварительной обработки и построения тепловых карт электропотребления использовались электронные таблицы MS Excel. Первичная оценка схожести электропотребления между домами также проводилась с помощью встроенных инструментов анализа данных Microsoft Excel. Здесь же осуществлялось и графическое представление временных рядов и диаграмм. Для построения более сложных визуализаций применялись библиотеки Matplotlib и Plotly на языке Python.

Проверка статистической значимости различий электропотребления между домами осуществлялась в программном обеспечении Statsoft Statistica с применением встроенных инструментов для построения графиков средних значений по группам потребителей. Более сложные диаграммы и статистические тесты выполнялись в среде Jupyter Notebook. Статистические тесты дисперсионного анализа преимущественно выполнялись с использованием библиотеки SciPy. Дополнительно для оценки различий между отдельными домами применялся тест Тьюки (Tukey's HSD) из библиотеки Statsmodels. Помимо дисперсионного анализа, в исследовании использовались методы корреляционного анализа, реализованные в среде Python. Основными библиотеками для обработки данных стали Pandas и NumPy, с помощью которых выполнялись задачи по загрузке, очистке, агрегации и исходных статистических данных.

Для проведения теста ANOVA требовалась предварительная обработка данных с преобразованием их из широкого формата (таблица 1) в длинный (таблица 2). В исходном формате данные были организованы в виде отдельных векторов для каждого дома, где значения электропотребления располагались вдоль временной шкалы. В процессе преобразования каждая запись была приведена к форме, в которой каждая строка представляла собой уникальное наблюдение, включающее идентификатор дома, временную метку и соответствующее значение потребления электроэнергии.

Таблица 2  
Table 2

Фрагмент перехода от широкого к длинному формату данных  
*A fragment of the transition from a wide to a long data format*

Дата-время	Номер дома	Потребление электроэнергии, кВт·ч
14-08-2023- 00:30:00	дом 15	0,07
14-08-2023- 01:00:00	дом 15	0,14
	...	...
07-10-2023- 23:00:00	дом 98	0,04
07-10-2023- 23:30:00	дом 98	0,07

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

**Результаты и обсуждение (Results and discussions)**

**Оценка статистических отличий электропотребления между домами**

Однофакторный дисперсионный анализ являлся ключевым инструментом для оценки статистически значимых различий в средних значениях электропотребления между жилыми домами. Суть проводимого исследования заключалась в проверке нулевой и альтернативной гипотез, которые формулировались следующим образом:

1) *Нулевая гипотеза (H0)*: предполагала, что нет никакой статистически значимой разницы в среднем электропотреблении между домами исследуемой деревни. Это означает, что любые наблюдаемые различия в данных могут быть результатом случайных изменений или ошибок измерения, а не системных различий.

2) *Альтернативная гипотеза (H1)*: предполагала обратное, то есть наличие статистически значимых различий в среднем потреблении электроэнергии хотя бы между некоторыми из исследуемых домов.

Для визуальной оценки распределения данных получасового электропотребления между домами построена диаграмма размаха (рисунок 2). Это позволило увидеть распределение данных по каждому дому, дополнительно методом межквартильного размаха выявить потенциальные выбросы и получить общее представление о вариативности потребления электроэнергии.

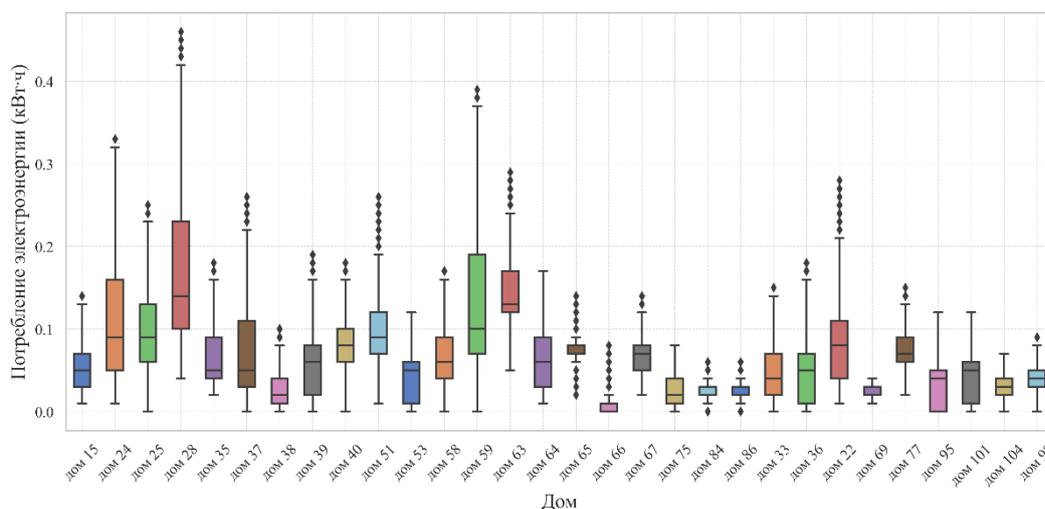


Рис. 2. Диаграмма размаха электропотребления жилых домов *Fig. 2. Diagram of the range of electricity consumption of residential buildings*

\*Источник: составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Предварительное построение диаграммы размаха позволяет увидеть различия в уровнях потребления электроэнергии между жилыми домами и выявить диапазон их колебаний. В таблице 3 приведены статистические показатели получасового электропотребления для отдельных жилых домов. В таблице приведены следующие обозначения: mean – среднее значение, std – стандартное отклонение, min и max – минимальное и максимальные значения, 25%, 50% (медиана) и 75% – квартильные значения.

Таблица 3  
*Table 3*

Фрагмент перехода от длинного широкого формата данных к длинному  
*A fragment of the transition from a long wide data format to a long one*

Номер дома	mean	std	min	25%	50%	75%	max
дом 101	0,040	0,028	0	0,01	0,05	0,06	0,12
дом 104	0,027	0,017	0	0,02	0,03	0,04	0,07
дом 15	0,051	0,030	0,01	0,03	0,05	0,07	0,14
дом 22	0,091	0,064	0,01	0,04	0,08	0,11	0,28
дом 24	0,110	0,074	0,01	0,05	0,09	0,16	0,33
дом 25	0,097	0,052	0	0,06	0,09	0,13	0,25
дом 28	0,174	0,096	0,04	0,1	0,14	0,23	0,46
дом 33	0,049	0,035	0	0,02	0,04	0,07	0,15

Окончание таблицы 3

Номер дома	mean	std	min	25%	50%	75%	max
дом 35	0,068	0,038	0,02	0,04	0,05	0,09	0,18
дом 36	0,052	0,044	0	0,01	0,05	0,07	0,18
дом 37	0,076	0,061	0	0,03	0,05	0,11	0,26
дом 38	0,028	0,025	0	0,01	0,02	0,04	0,1
дом 39	0,060	0,043	0	0,02	0,06	0,08	0,19
дом 40	0,082	0,034	0	0,06	0,08	0,1	0,18
дом 51	0,102	0,053	0,01	0,07	0,09	0,12	0,26
дом 53	0,042	0,029	0	0,01	0,05	0,06	0,12
дом 58	0,065	0,036	0	0,04	0,06	0,09	0,17
дом 59	0,133	0,088	0	0,07	0,1	0,19	0,39
дом 63	0,149	0,047	0,05	0,12	0,13	0,17	0,29
дом 64	0,065	0,036	0,01	0,03	0,06	0,09	0,17
дом 65	0,082	0,022	0,02	0,07	0,07	0,08	0,14
дом 66	0,010	0,018	0	0	0	0,01	0,08
дом 67	0,068	0,025	0,02	0,05	0,07	0,08	0,14
дом 69	0,024	0,007	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04
дом 75	0,025	0,019	0	0,01	0,02	0,04	0,08
дом 77	0,077	0,025	0,02	0,06	0,07	0,09	0,15
дом 84	0,029	0,011	0	0,02	0,03	0,03	0,06
дом 86	0,025	0,012	0	0,02	0,02	0,03	0,06
дом 95	0,035	0,031	0	0	0,04	0,05	0,12
дом 98	0,045	0,015	0	0,03	0,04	0,05	0,09

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из проведенного предварительного анализа описательной статистики можно сделать выводы о том, что наблюдаются значительные различия в потреблении электроэнергии между разными домами. Такое поведение может быть обусловлено множеством факторов, включая объем дома, количество жильцов, используемое оборудование и др. Некоторые дома, такие как дом 28, 59 и 63, имеют как высокое среднее потребление, так и большую вариабельность потребления. Для домов с низким стандартным отклонением и узким межквартильным размахом, как дом 66 и дом 69, характерно более предсказуемое и стабильное изменения получасового электропотребления. Несмотря на это, большинство домов имеют средние показатели потребления в промежутке от 0,04 до 0,08 кВт·ч, что может отражать общие бытовые потребности типового домохозяйства и может быть использовано при формировании среднего профиля получасовой мощности. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) предоставлены в таблице 4, где разложены компоненты вариации: межгрупповая (между домами) и внутригрупповая (внутри каждого дома) дисперсия.

Таблица 4

Table 4

Фрагмент перехода от длинного широкого формата данных к длинному

*A fragment of the transition from a long wide data format to a long one*

Параметры	Степени - свободы	Потребление ЭЭ, кВт·ч - SS	Потребление ЭЭ, кВт·ч - MS	Потребление ЭЭ, кВт·ч - F	Потребление ЭЭ, кВт·ч - p-значение
Св. член	1	323,6	323,6	152501,3	0,001
Фактор: Дом	29	105,2	4,4	2065,4	0,001
Ошибка	65510	139,0	0,002	–	–
Всего	65534	244,2	–	–	–

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Проведение дисперсионного анализа показало, что расход электроэнергии существенно различается между потребителями. То есть жилой дом как фактор оценки оказывает значимое влияние на электропотребление, о чем свидетельствуют высокая  $F$ -статистика (2065,4) и практически нулевое  $p$ -значение, подтверждающие статистическую значимость этих различий. Внутригрупповая изменчивость невелика ( $MS = 0,002$ ), что

указывает на стабильность потребления внутри каждого дома. Это приводит к выводу о том, что различия в энергопотреблении обусловлены именно характеристиками домов, а не случайными факторами. Стоит отметить, что дисперсионный анализ лишь показывает наличие статистически значимых различий в целом, но не указывает, между какими именно домами эти различия наиболее выражены. Таким образом, множественные сравнения средних являлось следующим логическим шагом в анализе после применение метода ANOVA. С этой целью использован Тьюки. В таблице 5 приводятся результаты тестов, где: 1 – обозначает статистически значимые различия между группами домов; 0 – указывает на отсутствие статистически значимых различий.

Таблица 5  
Table 5

Матрица результатов теста Тьюки о статистических различиях электропотребления между исследуемыми домами частной жилой застройки

*The matrix of the Tukey test results on statistical differences in power consumption between the studied houses of private residential development*

Номер дома	101	104	15	22	24	25	28	33	35	36	37	38	39	40	51	53	58	59	63	64	65	66	67	69	75	77	84	86	95	98	
101		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
104	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	
15	1	1		1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
22	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
24	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
25	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
28	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
33	1	1	0	1	1	1	1		1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
35	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
36	1	1	0	1	1	1	1	0	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
38	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
53	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
58	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1		1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
64	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1		1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	
66	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	
67	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1		1	1	1	1	1	1	1	
69	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	0	1	1	
75	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	1	1	
77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	
84	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	
86	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0		1	1
95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
98	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты теста Тьюки подтвердили наличие статистически значимых различий в получасовом электропотреблении между большинством исследуемых домов, что согласуется с выводами дисперсионного анализа. Матрица множественных сравнений демонстрирует сложную картину взаимосвязей: многие пары домов имеют достоверные различия в потреблении, при этом отдельные группы (например, дома 101 и 53, 104 и 38, 35 и 58 и др.) не показали значимой разницы. Отсутствие явных кластеров с однородным потреблением и преобладание единиц в матрице указывают на сложности в формировании отдельных классов домов со схожими характеристиками энергопотребления. Это позволяет предположить, что распределение домов по уровням потребления, например, относительно медианного значения или квартилей, может стать более практичным решением для классификации потребителей.

### Объединение статистических данных по целевым группам

На данном этапе исследования основное внимание было уделено группировке жилых домов по уровню потребления электроэнергии – выше или ниже медианного значения. Ожидалось, что такое разделение позволит более четко выявить различия между группами потребителей и провести детальный анализ электропотребления. Это, в свою очередь, поможет выявить ключевые факторы, влияющие на различия в потреблении, и разработать обоснованные подходы к формированию типовых профилей мощности для каждой группы в дальнейших исследованиях. Для анализа были объединены все данные получасового электропотребления на уровне отдельных домов. Распределение полученных значений визуализировано с помощью гистограммы рисунка 3.

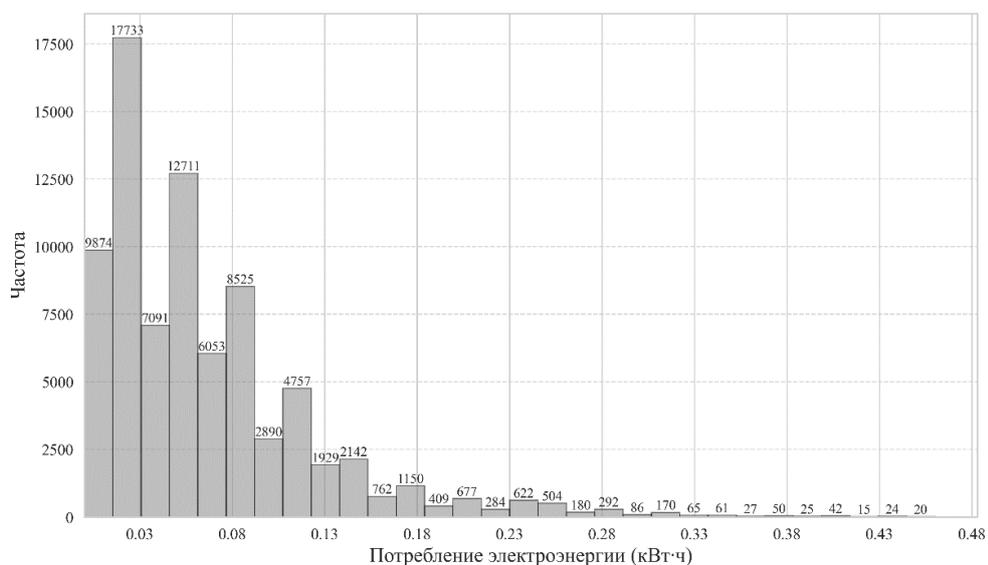


Рис. 3. Гистограмма получасового потребления электроэнергии по всем домам Fig. 3. Histogram of half-hourly electricity consumption for all houses

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Гистограмма показывает, что распределение потребления электроэнергии в получасовом интервале для большинства домов сосредоточено в низких диапазонах. Среднее потребление составило 0,07 кВт·ч, а медианное значение – 0,05 кВт·ч, что свидетельствует о наличии асимметрии с преобладанием домов с меньшим энергопотреблением. Для дальнейшего анализа дома были разделены на две группы: с потреблением ниже и выше медианного значения. Медиана 0,05 кВт·ч соответствует уровню средней получасовой мощности 100 Вт, что стало пороговым критерием для классификации домов (таблица 6).

Таблица 6

Table 6

Распределения жилых домов по уровню потребления на основе медианного сравнения

Distribution of residential buildings by consumption level based on median comparison

Группа	Номера домов	Примечание
1	104, 33, 38, 66, 69, 75, 84, 86, 95, 98	Низкое медианное потребление (<100 Вт): меньшая площадь, экономное использование электроэнергии.
2	101, 15, 22, 24, 25, 28, 35, 36, 37, 39, 40, 51, 53, 58, 59, 63, 64, 65, 67, 77	Высокое медианное потребление (≥100 Вт): большая площадь, интенсивное использование электрооборудования.

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Приведённая классификация жилых домов по уровням медианного потребления электроэнергии позволяет выделить типовые профили мощности для каждой из групп. Это достигается за счёт усреднения данных внутри групп по часам суток, что помогает сгладить индивидуальные особенности и получить обобщённое представление о закономерностях энергопотребления. На рисунке 4 приведены результаты сравнения средних профилей получасовой активной мощности групп низкого и высокого

потребления жилых домов. Здесь отчётливо прослеживается характерная особенность: для домов с высоким уровнем потребления (группа 2) наблюдаются выраженные пики мощности в вечерние часы, что связано с увеличением активности жильцов. Это может быть вызвано использованием бытовой техники, освещения, кухонного оборудования и других энергоёмких устройств в период с 18:00 до 22:00. В то же время дома с низким уровнем потребления (группа 1) демонстрируют более стабильные значения мощности в течение суток, с меньшей амплитудой изменений и менее выраженными пиковыми значениями.

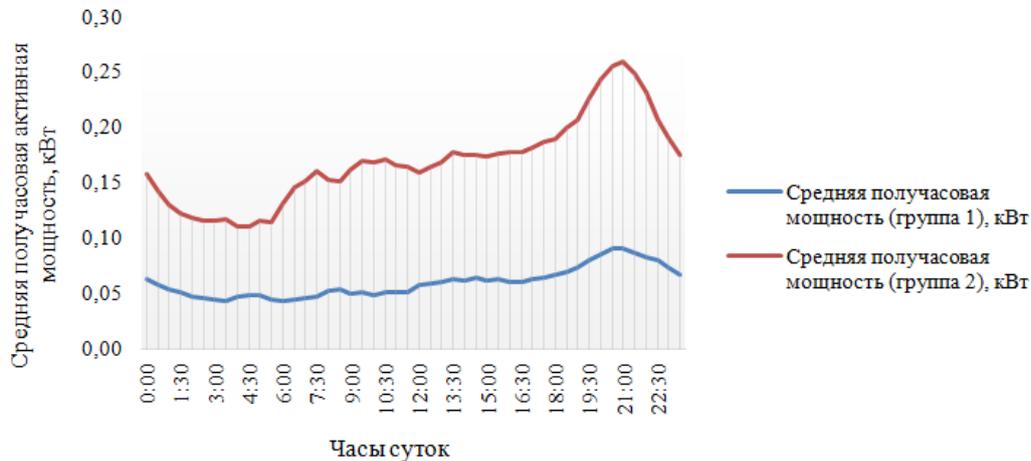


Рис. 4. Сравнение средних профилей получасовой активной мощности групп низкого и высокого потребления жилых домов

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выявленная вечерняя динамика в группе с высоким потреблением подчёркивает важность учёта временных факторов и поведенческих привычек жильцов при анализе энергопотребления и моделирования режимов в электрических сетях. Данные профили могут служить основой для дальнейшего изучения факторов, влияющих на характер нагрузки потребителей жилого сектора.

#### Выводы (Conclusions)

Проведенное исследование позволило выявить существенную неоднородность получасового электропотребления в частной жилой застройке, обусловленную различиями в технических характеристиках домов, поведенческих привычек жильцов и используемом электрооборудовании. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) подтвердили статистическую значимость различий между домами ( $F = 2065.4, p < 0,001$ ), при этом внутригрупповая изменчивость оказалась минимальной ( $MS = 0,002$ ), что свидетельствует о стабильности потребления внутри отдельных домохозяйств. Тест Тьюки выявил сложную структуру потребления: большинство пар домов демонстрируют значимые различия, что исключает возможность формирования отдельных кластеров на основе схожести профилей. Это подчеркивает необходимость применения упрощенных подходов к классификации, таких как разделение по уровням потребления относительно медианы.

Разделение домов на группы с низким (<100 Вт) и высоким ( $\geq 100$  Вт) медианным потреблением получасовой активной мощности позволило выделить типовые профили нагрузки. Для домов с высоким потреблением характерны выраженные вечерние пики (18:00–22:00), связанные с активным использованием энергоёмких бытовых приборов, тогда как группа с низким потреблением демонстрировала более равномерный профиль электрической мощности. Это указывает на важность учета временных свойств при оценке пропускной способности электрических сетей. Практическая значимость исследования заключается в интеграции результатов в программный комплекс LineCapacity, что упростило классификацию потребителей до двух уровней: с комплексным и без комплексного использования электрооборудования. Такой подход сократил время моделирования сетей за счет применения в качестве исходных данных установленных типовых нагрузок.

В части дальнейших исследований планируется расширение базы статистических данных, что позволит получить более репрезентативную выборку для анализа. В рамках этого этапа исследования будут изучены графики нагрузок с учётом сезонных факторов, таких как изменение потребления в зависимости от времени года и температурных

условий. Это обеспечит более глубокое понимание особенностей потребления электроэнергии в жилом секторе. Дополнительно будет исследована структура законов распределения мощности в рамках отдельных получасовых интервалов. Такой подход позволит выявить характерные свойства нагрузки, их вариабельность и закономерности, что станет основой для создания механизма имитационного моделирования энергопотребления.

### Литература

1. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах / Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Альзаккар [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 3-12. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12. – EDN DYCRRLP.
2. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., et al. The analysis of use of typical load schedules when the design or analysis of power supply systems // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. pp. 61–64.
3. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор-накопитель-потребитель» методом Монте-Карло // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 2. С. 160–170.
4. Демиденко А. С., Шведов Г. В. Суточные графики электрических нагрузок многоквартирных домов в системах электроснабжения городов // Энергосбережение теория и практика: труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, 19–23 октября 2020 года. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2020. С. 123–127.
5. Солянов Ю.И., Чернова Н.В., Федотов А.И., и др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы // Промышленная энергетика. 2022. № 9. С. 12–19.
6. Надтока И.И., Звонникова И.А., Васильев Г.П., и др. Анализ основных закономерностей в электропотреблении жилой части многоквартирных домов в Московском регионе // Промышленная энергетика. 2023. № 11. С. 21–27.
7. Капанский А.А. Климатические факторы и их роль в управлении энерго- и водопотреблением городской системы водоснабжения // Наука и техника. 2025. Т. 24. № 1. С. 72–82.
8. McLoughlin F., Duffy A., Conlon M. Characterising Domestic Electricity Consumption Patterns by Dwelling and Occupant Socio-Economic Variables: An Irish Case Study // Energy Buildings. 2012. Vol. 48. pp. 240–248.
9. Laicane I., Blumberga D., Blumberga A., et al. Comparative Multiple Regression Analysis of Household Electricity use in Latvia: Using Smart Meter Data to Examine the Effect of Different Household Characteristics // Energy Procedia. 2015. Vol. 72. pp. 49–56.
10. Sütterlin B., Brunner T.A., Siegrist M. Who puts the most energy into energy conservation? A segmentation of energy consumers based on energy-related behavioral characteristics // Energy Policy. 2011. Vol. 39, N12. pp. 8137–8152.
11. Poznaka L., Laicane I., Blumberga D., et al. Analysis of Electricity User Behavior: Case Study Based on Results from Extended Household Survey // Energy Procedia. 2015. Vol. 72. pp. 79 – 86.
12. Kapanski, A.A.; Klyuev, R.V.; Boltrushевич, A.E.; Sorokova, S.N.; Efremkov, E.A.; Demin, A.Y.; Martyushev, N.V. Geospatial Clustering in Smart City Resource Management: An Initial Step in the Optimisation of Complex Technical Supply Systems. Smart Cities 2025, 8, 14. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010014>
13. Грачева Е. И., Сафин А. Р., Садыков Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 48-52
14. Fedorov O. V. Expeditious forecasting of power consumption // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – С. 1-4.
15. Грачева, Е. И. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов. – Москва : Издательство «Русайнс», 2017. – 168 с. – ISBN 978-5-4365-1661-5. – EDNYNMXXT
16. Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Vaczynski, D., Vagapov, G. V., & Fedorov, O. V. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In E3S Web of Conferences (Vol. 124, p. 05060). EDP Sciences.
17. Усова А.С., Хмелевой С.В. Компьютеризированная система оптимизации потребления электроэнергии жилого дома // Информатика и кибернетика. 2020. № 1(19). С. 27–35.

18. Yahia Z., Pradhan A. Optimal load scheduling of household appliances considering consumer preferences: An experimental analysis // *Energy*. 2018. Vol. 163. pp. 15–26.
19. Chen S., Gao F., Guan X., et al. A residential load scheduling approach based on load behavior analysis: 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2014. pp. 954–959.
20. Rafiq H., Manandhar P., Rodriguez-Ubinas E., et al. Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study // *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 291.
21. Ramnath G.S., Harikrishnan R., Muyeen S.M., et al. Household Electricity Consumer Classification Using Novel Clustering Approach, Review, and Case Study // *Electronics*. 2022. Vol. 11, N15. 24 p.
22. Chen C., Wang M., Shen C., et al. Sensitivity analysis of factors influencing rural housing energy consumption in different household patterns in the Zhejiang province // *Buildings*. 2023. N13(2). 23 p.
23. Pukelsheim F. The three sigma rule // *The American Statistician*. 1994. Vol. 48, N2. pp. 88–91.

#### **Авторы публикации**

**Капанский Алексей Александрович** – доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: [kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru).

**Павлов Вадим Вячеславович** – студент 5 курса кафедры «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. Email: [mcplov24@gmail.com](mailto:mcplov24@gmail.com).

**Зализный Дмитрий Иванович** – доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. ORCID: 0000-0002-3852-7188. Email: [zaldmi@yandex.ru](mailto:zaldmi@yandex.ru).

**Веремеева Дарья Ивановна** – студентка 5 курса кафедры «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. Email: [dasha.kivit@gmail.com](mailto:dasha.kivit@gmail.com).

#### **References**

1. Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Alzakkar A, et al. Forecasting and analysis of power consumption and energy losses at industrial facilities. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki*. 2022; 24(6):3–12. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12
2. Trunova I, Miroshnyk O, Moroz O, et al. The analysis of use of typical load schedules when the design or analysis of power supply systems. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. pp. 61–64.
3. Dobrego KV. Model for electric load of community housing projects to investigate "generator - accumulator - consumer" system while using Monte-Carlo method. *Science and Technology*. 2017; 16(2):160–170. (In Russ.). doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170
4. Demidenko AS, Shvedov GV. Sutochnye grafiki elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh domov v sistemakh elektrosnabzheniya gorodov. Proceedings of the Tenth International School-Seminar for Young Scientists and Specialists Energy Saving - Theory and Practice, Moscow, NRU «MPEI», 19-23 October 2020. Kursk: Publishing house of JSC «University Book»; 2020. pp. 123–127. (In Russ.).
5. Soluyanov YUI, Chernova NV, Fedotov AI, et al. Analysis of the actual electrical loads of multi-apartment residential buildings in Moscow. *Promyshlennaya energetika*. 2022; 9:12–19. (In Russ.). doi:10.34831/EP.2022.82.36.002
6. Nadtoka II, Zvoznikova IA, Vasilev GP, et al. Analysis of the main regularities in the power consumption of the residential part of apartment buildings in the Moscow region. *Promyshlennaya energetika*. 2023; 11:21–27. (In Russ.). doi: 10.34831/EP.2023.71.11.003
7. Kapanski AA. Climatic factors and their role in energy management and water consumption in the urban water supply system. *Science and Technique*. 2025; 24(1):72–82. (In Russ.). doi: 10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82
8. McLoughlin F, Duffy A, Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study. *Energy Buildings*. 2012; 48:240–248. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.037
9. Laicane I, Blumberga D, Blumberga A, et al. Comparative multiple regression analysis of household electricity use in Latvia: Using smart meter data to examine the effect of different household characteristics. *Energy Procedia*. 2015; 72:49–56. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.008

10. Sütterlin B, Brunner TA, Siegrist M. Who puts the most energy into energy conservation? A segmentation of energy consumers based on energy-related behavioral characteristics. *Energy Policy*. 2011; 39(12):8137–8152. doi: 10.1016/j.enpol.2011.10.008
11. Poznaka L, Laicane I, Blumberga D, et al. Analysis of electricity user behavior: Case study based on results from extended household survey. *Energy Procedia*. 2015; 72:79–86. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.012
12. Kapanski AA, Klyuev RV, Boltrushevich AE, Sorokova SN, Efremkov EA, Demin AY, Martyushev NV. Geospatial clustering in smart city resource management: An initial step in the optimisation of complex technical supply systems. *Smart Cities*. 2025; 8(1):14. doi: 10.3390/smartcities8010014
13. Gracheva EI, Safin AR, Sadykov RR. Application of an analytical method for calculating the reliability of power supply system elements based on probabilistic models. *Reliability and Safety in Energy*. 2017; 10(1):48–52. (In Russ.)
14. Fedorov OV. Expeditious forecasting of power consumption. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076465
15. Gracheva EI, Naumov OV. Energy losses and efficiency of equipment in shop networks. Moscow: Rusains Publishing; 2017. 168 p. (In Russ.). ISBN: 978-5-4365-1661-5
16. Hruntovich NV, Kapanski AA, Baczynski D, Vagapov GV, Fedorov OV. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. *E3S Web of Conferences*. 2019; 124:05060. doi: 10.1051/e3sconf/201912405060
17. Usova AS, Khmelevoy SV. Computerised system optimization of electricity consumption of residential buildings. *Informatika i kibernetika*. 2020; 1(19):27–35. (In Russ.)
18. Yahia Z, Pradhan A. Optimal load scheduling of household appliances considering consumer preferences: An experimental analysis. *Energy*. 2018; 163:15–26. doi: 10.1016/j.energy.2018.08.113
19. Chen S, Gao F, Guan X, et al. A residential load scheduling approach based on load behavior analysis. 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2014. pp. 954–959.
20. Rafiq H, Manandhar P, Rodriguez-Ubinas E, et al. Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study. *Energy and Buildings*. 2023; 291:113103. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113103
21. Ramnath GS, Harikrishnan R, Muyeen SM, et al. Household electricity consumer classification using novel clustering approach, review, and case study. *Electronics*. 2022; 11(15):24. doi: 10.3390/electronics11152302
22. Chen C, Wang M, Shen C, et al. Sensitivity analysis of factors influencing rural housing energy consumption in different household patterns in the Zhejiang province. *Buildings*. 2023; 13(2):23. doi: 10.3390/buildings13020463
23. Pukelsheim F. The three sigma rule. *The American Statistician*. 1994; 48(2):88–91. doi: 10.2307/2684253

#### **Authors of the publication**

**Alexey A. Kapanski** – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: [kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru).

**Vadim V. Pavlov** – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. Email: [mcplov24@gmail.com](mailto:mcplov24@gmail.com)

**Dmitry I. Zalizny** – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0002-3852-7188. Email: [zaldmi@yandex.ru](mailto:zaldmi@yandex.ru)

**Daria I. Veremeeva** – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. Email: [dasha.kivit@gmail.com](mailto:dasha.kivit@gmail.com).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

**Получено** 21.03.2025 г.

**Отредактировано** 24.03.2025 г.

**Принято** 25.03.2025 г.



**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ  
НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ  
В СИСТЕМАХ ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ  
ОСНОВНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

**Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю.**

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия**

*petroval13@mail.ru*

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В статье исследуются вопросы оценки параметров надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов (НКА), устанавливаемых в низковольтных электрических сетях систем электроснабжения промышленных предприятий. **ЦЕЛЬ.** Исследование основных параметров надежности контактов НКА с использованием статистического метода и анализ физических процессов в контактных соединениях. **МЕТОДЫ.** Для повышения точности определения интенсивности отказов НКА предлагается ввести поправочные коэффициенты, которые учитывают влияние основных воздействующих факторов на исследуемые НКА. Исследование коммутационного ресурса контактов было выполнено аналитическим и графико-аналитическим методом. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** На основании проведенных исследований установлено, что для повышения достоверности оценки параметров НКА может быть рекомендован графико-аналитический метод с учетом поправочных коэффициентов. Значение числа циклов коммутаций аппарата, после которого появление отказа наиболее вероятно, зависит от его коэффициента загрузки. Выявлено, что для исследуемых аппаратов по истечении 25% ресурса числа коммутаций вероятность безотказной работы становится ниже допустимого значения. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты исследований показывают, что после 3-5 лет эксплуатации вероятность безотказной работы наблюдаемых НКА снизилась до значения менее 0,85. Полученные результаты рекомендуется учитывать при составлении графиков планово-предупредительного ремонта в электрических сетях внутрицехового электроснабжения.

**Ключевые слова:** *низковольтная сеть; коммутационный аппарат; надежность; поправочный коэффициент; ресурс коммутации.*

**Для цитирования:** Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрицехового электроснабжения с учетом основных воздействующих факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 38 -52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

**IMPROVING THE ACCURACY OF ESTIMATION OF RELIABILITY PARAMETERS  
OF LOW-VOLTAGE SWITCHING DEVICES INSTALLED IN THE SYSTEMS OF IN-  
HOUSE POWER SUPPLY TAKING INTO ACCOUNT THE MAIN INFLUENCING  
FACTORS**

**Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu.**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**

*petroval13@mail.ru*

**Abstract:** *RELEVANCE.* The article investigates the issues of evaluating the reliability parameters of contacts of low-voltage switching devices (LWSD) installed in low-voltage electrical networks of power supply systems of industrial enterprises. **OBJECT.** To investigate the main parameters of reliability of LWSD contacts using the statistical method and to analyze the physical processes in the contact connections. **METHODS.** To improve the accuracy of determining the LWSD failure rate, it is proposed to introduce correction factors that take into account the influence of the main influencing factors on the studied LWSD. The study of the switching life of contacts was performed

by analytical and graphical-analytical methods. **RESULTS.** On the basis of the conducted researches it has been established that the graphical-analytical method with taking into account correction factors can be recommended to increase the reliability of LWSD parameters estimation. The value of the number of switching cycles of the device, after which the occurrence of failure is most likely, depends on its loading factor. It is revealed that for the studied devices after expiration of 25% of the resource number of switching cycles the probability of failure-free operation becomes lower than the permissible value. **CONCLUSIONS.** The research results show that after 3-5 years of operation the probability of failure-free operation of the observed LWSD decreased to the value less than 0.85. The obtained results are recommended to be taken into account when drawing up schedules of preventive maintenance in the electrical networks of in-house power supply.

**Keywords:** low-voltage network; switching device; reliability; correction factor; switching resource.

**For citation:** Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of in-house power supply taking into account the main influencing factors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3):38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

### **Введение (Introduction)**

Как известно, повреждение контактов большинства коммутационных электрических аппаратов, является одной из основных причин их выхода из строя [1-3]. Объясняется это конструктивными особенностями аппаратов и физическими процессами, протекающими в контактах при коммутации аппаратами силовых цепей [4-6]. Поэтому исследование и оценка параметров надежности аппаратов в эксплуатационных режимах, является в настоящее время, в условиях развития электротехнической промышленности России, актуальной задачей.

Надежность НКА может быть рассчитана при определении состава и интенсивности воздействия различных внешних и внутренних факторов в процессе работы на основные узлы и на оборудование в целом [7-9].

Оценку параметров надежности аппаратов проводят с использованием статистических данных по отказам [10, 11].

Одними из современных методов исследования и способов повышения надежности аппаратов являются:

- метод проектирования силы удержания контакта на основе динамического и статического моделирования и результатов экспериментальных испытаний [12];
- исследование возможностей оценки технического состояния электроконтактных соединений и прогнозирования их остаточного ресурса по результатам термографического обследования [13];
- моделирование силы трения скользящего электрического контакта при переменной нагрузке на основе анализа экспериментальных данных [14];
- использование защитного металлического покрытия для уменьшения износа деталей [15, 16];
- оценка надежности в режиме онлайн, которая определяет эрозию контакта в зависимости от электрической нагрузки при прогнозировании электрической долговечности [17];
- моделирование влияния перепадов напряжения на контактное сопротивление и на температуру контактных соединений низковольтного электрооборудования [18].

Эксплуатация аппарата, как известно, связана с нагревом контактов, обусловленным протекающим током. При этом повышается переходное сопротивление контактных соединений [19-21]. Допустимые превышения температуры контактов определяются условиями эксплуатации и зависят от температуры окружающей среды, давления, режима работы и применяемых материалов [22-24]. Нагрев контактных соединений происходит под воздействием различных источников теплоты, интенсивность которых меняется в зависимости от режима работы и загрузки аппарата [25-27]. Различные элементы аппаратов при протекании тока нагреваются неравномерно, поэтому температура контактных соединений обычно выше, чем температура прилегающих к нему проводников [28, 29].

Для оценки надежности коммутационных аппаратов выделим четыре основных состояния в режиме их эксплуатации:

- I – режим коммутации;
- II – режим работы при номинальных значениях;
- III – режим работы при аварийных ситуациях;
- IV – режим сохранения работоспособности при хранении.

Основными показателями надежности аппаратов при этом являются:

- I – вероятность безотказной работы при коммутации с нагрузкой  $P_n(t)$  и без нагрузки  $P_{бн}(t)$ ; наработка на отказ при коммутации с нагрузкой  $T_n$  и без нагрузки  $T_{бн}$ ;
- II – вероятность безотказной работы при эксплуатации аппарата с номинальными значениями  $P_{ном}(t)$ ; наработка на отказ  $T_{ном}$ ;
- III – вероятность безотказной работы в режиме срабатывания защиты  $P_з(t)$ ; наработка на отказ  $T_з$ ;
- IV – вероятность обеспечения безотказной эксплуатации при хранении  $P_x(t)$ ; наработка на отказ  $T_x$ .

В таблице 1 приведены основные показатели надежности для различных типов НКА.

Таблица 1  
Table 1

Показатели надежности аппаратов  
Reliability indicators of the apparatus

Тип аппарата	I	II	III	IV
Автоматические выключатели	$P_n(t); P_{бн}(t)$	$P_{ном}(t)$	$P_з(t)$	$P_x(t)$
	$Q_n(t); Q_{бн}(t)$	$Q_{ном}(t)$	$Q_з(t)$	$Q_x(t)$
	$T_n; T_{бн}$	$T_{ном}$	-	$T_x$
Контакторы	$P_n(t); P_{бн}(t)$	$P_{ном}(t)$	-	$P_x(t)$
	$Q_n(t); Q_{бн}(t)$	$Q_{ном}(t)$	-	$Q_x(t)$
	$T_n; T_{бн}$	$T_{ном}$	-	$T_x$
Магнитные пускатели	$P_n(t); P_{бн}(t)$	$P_{ном}(t)$	$P_з(t)$	$P_x(t)$
	$Q_n(t); Q_{бн}(t)$	$Q_{ном}(t)$	$Q_з(t)$	$Q_x(t)$
	$T_n; T_{бн}$	$T_{ном}$	-	$T_x$
Рубильники	$P_n(t); P_{бн}(t)$	$P_{ном}(t)$	-	$P_x(t)$ ;
	$Q_n(t); Q_{бн}(t)$	$Q_{ном}(t)$	-	$Q_x(t)$
	$T_n; T_{бн}$	$T_{ном}$	-	$T_x$
Пакетные выключатели	$P_n(t); P_{бн}(t)$	$P_{ном}(t)$	-	$P_x(t)$ ;
	$Q_n(t); Q_{бн}(t)$	$Q_{ном}(t)$	-	$Q_x(t)$
	$T_n; T_{бн}$	$T_{ном}$	-	$T_x$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Материалы и методы (Materials and methods)

Надежность НКА, как известно, в основном зависит от уровня надежности электрических контактов. Отказы в контактных системах характеризуются загрязнением продуктами износа деталей подвижной части, уменьшением контактного давления ниже допустимого значения. Также отказы возникают из-за недостаточности зазоров между контактами, обусловленных деформациями контактных и возвратных пружин.

Надежность контактов характеризуется интенсивностью  $\lambda(k)$  и вероятностью безотказной работы  $P(k)$

$$P(k) = e^{-\int_0^k \lambda(k) dk} \quad (1)$$

где  $k$  – количество коммутаций.

При определении параметров надежности электрических контактов применяется показательный закон распределения, так как данный закон справедлив на небольшом интервале времени по сравнению с ресурсом долговечности самого аппарата, когда ещё незначительно сказывается старение материалов, но период приработки уже закончился. Поэтому выражение (1) упрощается

$$P(k) = e^{-\lambda k} \quad (2)$$

$\lambda(k)$  при графико-аналитическом методе исследования

$$\lambda(k) = -\frac{\ln P(k)}{t} = 2,3 \frac{-\lg P(k)}{t} \quad (3)$$

Графико-аналитический метод исследования – уравнение прямой, проходящей через начало координат под углом  $\alpha$  ( $\operatorname{tg}\alpha = \lambda/2,3$ ),  $\lambda(k)$  определяется произведением  $\operatorname{tg}$  угла наклона прямых с осью абсцисс и числа 2,3.

Если принять, что учет доверительных границ надежности не влияет на характер появления отказов, то преобразуем выражение (3)

$$-\lg[1 - Q(k)] = \frac{\lambda_{\Gamma}}{2,3} k$$

где  $P(k) = 1 - Q(k) = 1 - \frac{n}{N}$ ;

$n$  – количество отказавших аппаратов;

$N$  – общее количество аппаратов.

При аналитическом методе используем выражение

$$\lambda_a = \frac{n}{\sum_{i=1}^n k_i + (N - n) \cdot k}, \text{ 1/цикл}$$

где  $k_i$  – количество коммутаций до момента отказа  $i$ -ого аппарата.

Для расчетов преобразуем выражение (5)

$$\lambda_a = \frac{n}{N \cdot k}, \text{ 1/цикл}$$

При расчете  $\lambda$ , вне зависимости от метода исследования, введем поправочные коэффициенты, которые учитывают влияние основных воздействующих факторов на исследуемые аппараты. Коэффициенты характеризуют отклонения  $\lambda$  при изменениях условий эксплуатации от исходных значений.

Тогда  $\lambda$  аппаратов будет определяться как

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, \text{ 1/цикл}$$

где  $\lambda_{0i}$  – начальное значение  $\lambda$ ;

$b_1$  – коэффициент, учитывающий загрузку и температуру нагрева контактов. Коммутационные аппараты эксплуатируются в режиме работы, близком к номинальному, поэтому значение коэффициента загрузки  $K_3 = [0; 1,2]$ .

$b_2$  – коэффициент, учитывающий механические воздействия (вибрации, удары и дребезг контактов) – для аппаратов промышленного назначения принимается – 2 (при температуре окружающей среды от 20 °С до 40 °С) [30];

$b_3$  – коэффициент, учитывающий отказы в процессе эксплуатации. Поправочный коэффициент учитывает основные виды отказов аппарата (износ контактов, залипание контактов и перегрев) от коэффициента загрузки.

Причина отказов в замыкающих контактах объясняется тем, что контактное усилие в процессе эксплуатации аппарата уменьшается активнее, чем у размыкающих контактов из-за износа подвижных деталей. Отказы в размыкающих контактах возникают за счет эрозии контактов из-за более длительного горения дуги.

Значения коэффициентов  $b_1, b_2, b_3$ , полученные в результате аппроксимации статистических данных, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Поправочные коэффициенты при определении  $\lambda$  аппаратов  
Correction factors for determining the  $\lambda$  of the apparatuses

Тип аппарата	$b_1$	$b_2$	$b_3$ при загрузке аппарата		
			до 0,4	0,4 – 0,8	0,8 – 1,2
Автоматические выключатели	$b_1 = 0,3934 \cdot K_3^2 + 0,2701 \cdot K_3 + 0,7239$	2	0,2	0,35	0,45
Контакторы	$b_1 = 0,3054 \cdot e^{1,5938 \cdot K_3}$		0,25	0,35	0,4
Магнитные пускатели	$b_1 = 0,3054 \cdot e^{1,5938 \cdot K_3}$		0,25	0,35	0,4
Рубильники	$b_1 = 0,4383 \cdot K_3^2 - 0,0226 \cdot K_3 + 0,7898$		0,2	0,35	0,45
Пакетные выключатели	$b_1 = 0,4383 \cdot K_3^2 - 0,0226 \cdot K_3 + 0,7898$		0,2	0,35	0,45

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

**Обсуждение результатов**

Графико-аналитический метод определения  $\lambda(k)$  с учетом поправочных коэффициентов

$$\lambda_T = \frac{-2,3 \cdot \lg\left[1 - Q(t)\right]}{t} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, \text{ 1/цикл} \quad (8)$$

Проведем расчет для автоматических выключателей

$$\lambda_T = \frac{-2,3 \cdot \lg\left[1 - \frac{79}{184}\right]}{8000} \cdot (0,3934 \cdot 1^2 + 0,2701 \cdot 1 + 0,7239) \cdot 2 \cdot 0,45 = 8,82 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

Без учета поправочных коэффициентов  $\lambda(k)$  для исследуемых автоматических выключателей

$$\lambda_T = \frac{-2,3 \cdot \lg\left[1 - \frac{79}{184}\right]}{8000} = 7,06 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

Минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания вероятности времени безотказной работы с заданной точностью и достоверностью определяется по выражению

$$V = \left( \frac{\tau \cdot \gamma \cdot 100}{\Delta} \right)^2 \quad (9)$$

где  $\tau$  – параметр, зависящий от необходимой достоверности;  
 $\gamma$  – коэффициент вариации.

$$\gamma = \frac{\sigma}{M} \quad (10)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;  
 $M$  – математическое ожидание.

Достоверность результатов исследования вероятности времени безотказной работы по минимальному объему выборки, возможна при вероятности, равной, 0,95 погрешность не должна превышать 5 %. Определим  $M$  и  $\sigma$  составив таблицу 3, где отражены данные  $P(k)$ .

Таблица 3  
 Table 3

Определение  $M$  и  $\sigma$   
 Determination of  $M$  and  $\sigma$

$k$	$P(k)$	$M(P)$	$\sigma$	$\sigma(P)$
0	1	0,718	0,0791	0,156
400	0,9653		0,0608	
800	0,9318		0,0454	
1200	0,8995		0,0327	
1600	0,8683		0,0224	
2000	0,8382		0,0143	
2400	0,8091		0,0082	
2800	0,7811		0,0039	
3200	0,7540		0,0012	
3600	0,7278		0,0001	
4000	0,7026		0,0003	
4400	0,6782		0,0016	
4800	0,6547		0,0041	
5200	0,6320		0,0075	
5600	0,6100		0,0118	
6000	0,5889		0,0169	
6400	0,5685		0,0226	
6800	0,5487		0,0289	
7200	0,5297		0,0357	
7600	0,5113	0,0430		
8000	0,4936	0,0507		

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В этом случае математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение вероятности времени безотказной работы будут принимать значения

$$M(P) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{P_i(k)}{n} \right] = \frac{1 + \dots + 0,4936}{21} = 0,718$$

$$\sigma(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i(k) - M(P))^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(1-0,718)^2 + \dots + (0,4936-0,718)^2}{20}} = 0,156$$

Определим объем выборки необходимый для обеспечения погрешности 5 %.

$$\gamma = \frac{0,156}{0,718} = 0,217$$

$$V = \left( \frac{2 \cdot 0,217 \cdot 100}{5} \right)^2 = 75,34 \approx 76$$

Следовательно, минимальный объем выборки, необходимый для показателей достоверности 95% составляет 76 автоматических выключателей, исследованное же количество единиц оборудования составило 184.

В таблице 4 приведены минимальные объемы выборки НКА для применения графико-аналитического метода исследования.

Таблица 4  
Table 4

Определение минимального объема выборки аппаратов  
*Determination of the minimum sample size of the apparatus*

Тип аппарата	$M(P)$	$\sigma(P)$	$\gamma$	$V$	$N$
Автоматические выключатели	0,718	0,156	0,217	76	184
Контакты	0,603	0,208	0,345	191	220
Магнитные пускатели	0,645	0,190	0,294	139	196
Рубильники	0,720	0,156	0,216	75	92
Пакетные выключатели	0,740	0,146	0,197	63	85

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты таблицы 4 показывают достаточность выборки ( $N > V$ ) при исследовании  $\lambda$  НКА.

Определим доверительный интервал для  $\lambda$  с помощью таблицы  $\chi^2$ , где параметрами являются уровень значимости и число степеней свободы  $r$ .

$$r_1 = \frac{2n}{\chi^2[p(\varepsilon); 2n]} ; r_2 = \frac{2n}{\chi^2[1-p(\varepsilon); 2n]}$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{r_1} ; \lambda_g = \frac{\lambda}{r_2}$$

Доверительный интервал для автоматических выключателей составит

$$r_1 = \frac{2 \cdot 79}{\chi^2[0,95; 2 \cdot 79]} = \frac{158}{129,94} = 1,21$$

$$r_2 = \frac{2 \cdot 79}{\chi^2[0,05; 2 \cdot 79]} = \frac{158}{188,33} = 0,84$$

$$\lambda_{г.н} = \frac{\lambda}{r_1} = \frac{8,82 \cdot 10^{-5}}{1,21} = 7,26 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

$$\lambda_{г.в} = \frac{\lambda}{r_2} = \frac{8,82 \cdot 10^{-5}}{0,84} = 10,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

По аналогии проведем расчет аналитическим методом  $\lambda(k)$  с учетом поправочных коэффициентов для автоматических выключателей

$$\lambda_a = \frac{n}{N \cdot k} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, \text{ 1/цикл}$$

$$\lambda_a = \frac{79}{189 \cdot 8000} \cdot (0,3934 \cdot 1^2 + 0,2701 \cdot 1 + 0,7239) \cdot 2 \cdot 0,45 = 6,76 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

Без учета поправочных коэффициентов  $\lambda(k)$

$$\lambda_a = \frac{79}{189 \cdot 8000} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

В этом случае  $M(P) = 0,773$  и  $\sigma(P) = 0,129$ .

Определим объем выборки необходимый для обеспечения погрешности 5 %.

$$\gamma = \frac{0,129}{0,773} = 0,167$$

$$V = \left( \frac{2 \cdot 0,167 \cdot 100}{5} \right)^2 = 44,82 \approx 45$$

Следовательно, минимальный объем выборки, необходимый для показателей достоверности 95% составляет 45 автоматических выключателей, исследованное количество единиц оборудования составило 184.

Доверительный интервал составит

$$\lambda_{a.n} = \frac{\lambda}{r_1} = \frac{6,76 \cdot 10^{-5}}{1,21} = 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

$$\lambda_{a.v} = \frac{\lambda}{r_1} = \frac{6,76 \cdot 10^{-5}}{0,84} = 8,06 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

В таблице 5 приведены результаты расчетов  $\lambda$  с учетом поправочных коэффициентов и их нижние и верхние доверительные границы.

Таблица 5

Table 5

Результаты исследования  $\lambda$  аппаратов  
Results of the study of  $\lambda$  apparatuses

Тип аппарата	k, циклов	N, шт	n, шт	Графико-аналитический метод			Аналитический метод		
				$\lambda_g$	$\lambda_{g.n}$	$\lambda_{g.v}$	$\lambda_a$	$\lambda_{a.n}$	$\lambda_{a.v}$
Автоматические выключатели	8000	184	79	$8,82 \cdot 10^{-5}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$10,5 \cdot 10^{-5}$	$6,76 \cdot 10^{-5}$	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$8,06 \cdot 10^{-5}$
Контакты	800000	220	134	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$9,13 \cdot 10^{-7}$	$7,87 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$
Магнитные пускатели	1000000	196	108	$9,59 \cdot 10^{-7}$	$8,13 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	$6,61 \cdot 10^{-7}$	$5,60 \cdot 10^{-7}$	$7,69 \cdot 10^{-7}$
Рубильники	10000	92	44	$7,02 \cdot 10^{-5}$	$5,37 \cdot 10^{-5}$	$8,84 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-5}$	$6,61 \cdot 10^{-5}$
Пакетные выключатели	5000	85	38	$12,8 \cdot 10^{-5}$	$9,57 \cdot 10^{-5}$	$16,4 \cdot 10^{-5}$	$9,66 \cdot 10^{-5}$	$7,23 \cdot 10^{-5}$	$12,4 \cdot 10^{-5}$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости по результатам расчетов для исследуемых аппаратов графико-аналитическим и аналитическим методами представлены на рисунках 1-5.

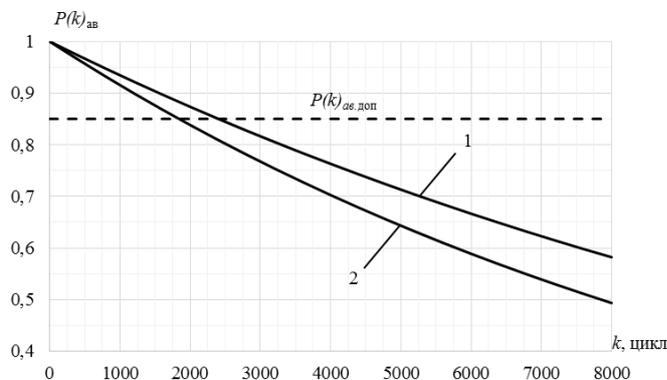


Рис. 1. Зависимость  $P(k)_{ав}$  с учетом поправочных коэффициентов для автоматических выключателей: 1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

Fig. 1. Dependence of  $P(k)_{ав}$  taking into account correction factors for circuit breakers: 1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

аналитический метод

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

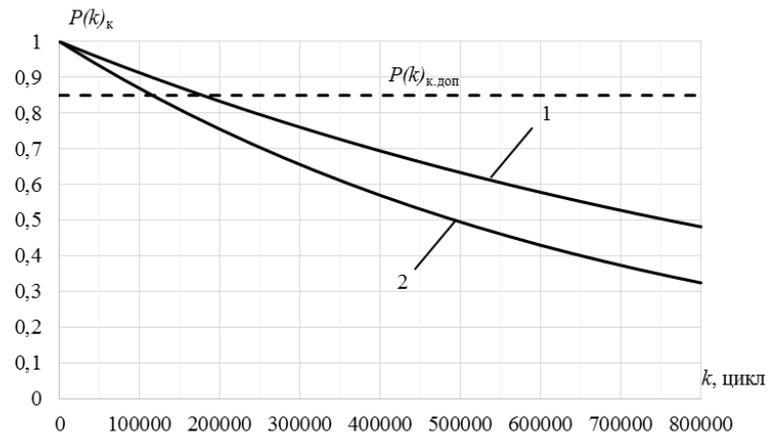


Рис. 2. Зависимость  $P(k)_к$  с учетом поправочных коэффициентов для контакторов:  
1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

Fig. 2. Dependence of  $P(k)_к$  taking into account correction factors for contactors:  
1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

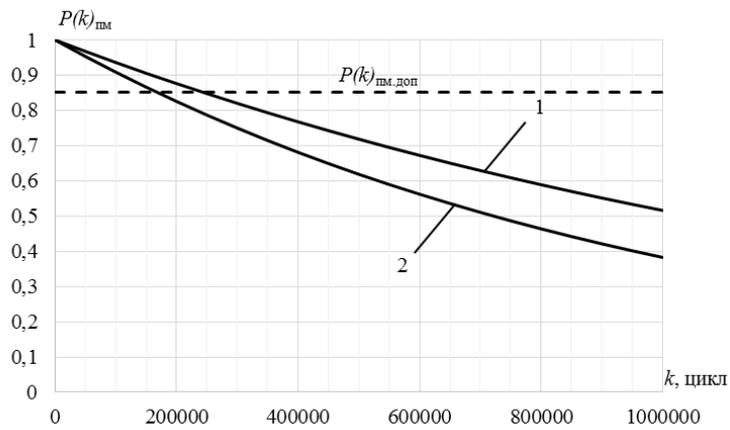


Рис. 3. Зависимость  $P(k)_пм$  с учетом поправочных коэффициентов для магнитных пускателей: 1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

Fig. 3. Dependence of  $P(k)_пм$  taking into account correction factors for magnetic starters:  
1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

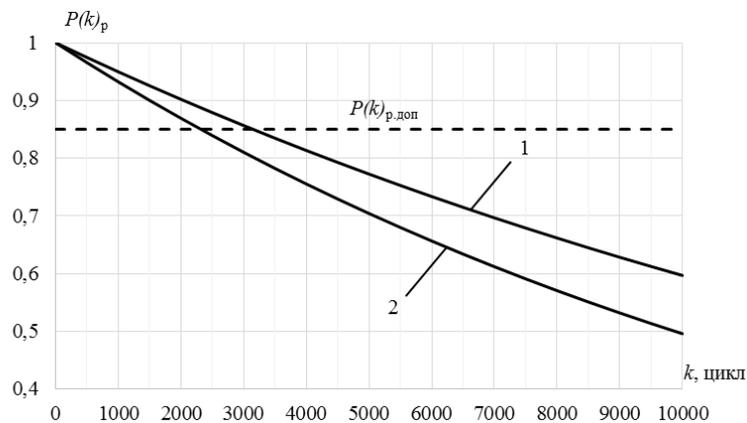


Рис. 4. Зависимость  $P(k)_р$  с учетом поправочных коэффициентов для рубильников:  
1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

Fig. 4. Dependence of  $P(k)_р$  taking into account correction factors for switchgear:  
1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

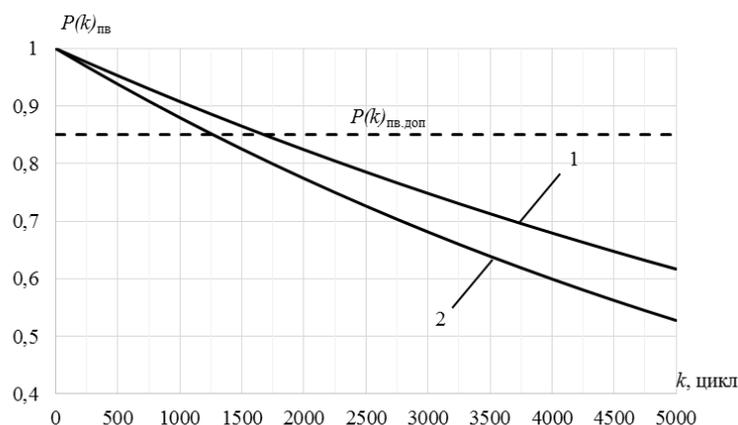


Рис. 5. Зависимость  $P(k)_{пв}$  с учетом поправочных коэффициентов для пакетных выключателей: 1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

Fig. 5. Dependence of  $P(k)_{пв}$  taking into account correction factors for packet switches: 1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании полученных графиков (рисунки 1-5) и статистических данных можно сделать вывод о том, что наиболее достоверным методом исследования надежности контактов является графико-аналитический метод с учетом поправочных коэффициентов. Метод позволяет проводить исследования параметров надежности НКА при условии, что число отказов возникает не равномерно на всем сроке эксплуатации аппарата. Таким образом, предлагаемый метод позволяет повысить точность определения параметров надежности путем исследования различных режимов коммутации аппаратов.

В таблице 6 показаны контрольные точки показателя  $P(k)$  при исследовании графико-аналитическим методом.

Таблица 6

Table 6

Коммутационный ресурс аппаратов  
Switching life of devices

Аппараты	$P(k)$				
	10 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Автоматические выключатели	0,9318	0,8382	0,7025	0,5888	0,4936
Контакты	0,8935	0,7546	0,5695	0,4298	0,3243
Магнитные пускатели	0,9084	0,7866	0,6188	0,4868	0,3829
Рубильники	0,9322	0,8391	0,7040	0,5907	0,4957
Пакетные выключатели	0,9380	0,8523	0,7264	0,6192	0,5277

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Данные таблицы 6 показывают, что при достижении 25% ресурса коммутации  $P(k)$  большинства НКА становится ниже допустимого значения ( $P(k)_{доп} = 0,85$ ) согласно ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия».

Определим погрешности при неучете поправочных коэффициентов при определении  $\lambda(k)$ ,  $P(k)$  и  $Q(k)$ . В таблице 7 показаны погрешности от неучета поправочных коэффициентов при определении основных параметров надежности графико-аналитическим методом.

Таблица 7

Table 7

Погрешности при определении параметров надежности при графико-аналитическом методе

Errors in determining reliability parameters using the graphical-analytical method

Тип аппарата	$\delta_{\lambda}$ , %	$\delta_P$ , %	$\delta_Q$ , %
Автоматические выключатели	-20,6	+7,6	-16,9
Контакты	-16,7	+10,0	-12,3
Магнитные пускатели	-16,7	+8,5	-12,8
Рубильники	-7,4	+2,7	-5,9
Пакетные выключатели	-7,4	+2,4	-6,0

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 7:

- $\delta_\lambda$  – погрешность при определении  $\lambda(k)$ ;
- $\delta_P$  – погрешность при определении  $P(k)$ ;
- $\delta_Q$  – погрешность при определении  $Q(k)$ .

Диапазон числа коммутаций аппарата, в пределах которого появление отказа наиболее вероятно, зависит от типа отказа и от коэффициента загрузки. Фактический ресурс контактных соединений ограничивается числом коммутаций с учетом верхней и нижней границы доверительного интервала.

Определим ресурс эксплуатации коммутационных аппаратов. На рисунке 6 представлены сравнительные графические зависимости  $P(t)$  исследуемых аппаратов от срока эксплуатации с учетом поправочных коэффициентов  $b_1, b_2, b_3$ .

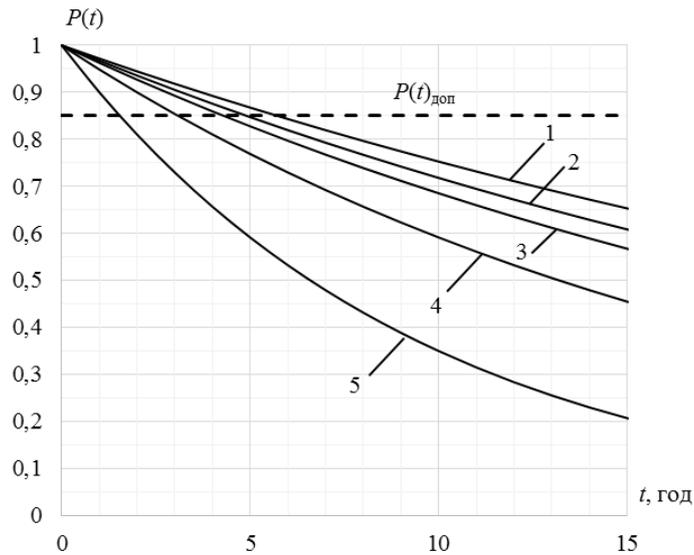


Рис. 6. Зависимость  $P(t)$  с учетом поправочных коэффициентов:

- 1 – пакетные выключатели; 2 – автоматические выключатели; 3 – рубильники; 4 – магнитные пускатели; 5 – контакторы

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 6. Dependence  $P(t)$  taking into account correction factors:

- 1 - packet switches; 2 - circuit breakers; 3 - switchgear; 4 - magnetic starters; 5 - contactors

В таблице 8 представлены результаты расчетов  $P(t)$  исследуемых аппаратов от срока эксплуатации.

Таблица 8  
Table 8

Результаты расчетов  $P(t)$  коммутационных аппаратов  
Calculation results  $P(t)$  of switching devices

Аппараты	t, год				
	1	3	5	10	15
Автоматические выключатели	0,9674	0,9054	0,8473	0,7179	0,6083
Контакторы	0,9002	0,7295	0,5912	0,3495	0,2066
Магнитные пускатели	0,9488	0,8541	0,7689	0,5912	0,4545
Рубильники	0,9629	0,8927	0,8277	0,6852	0,5672
Пакетные выключатели	0,9720	0,9183	0,8676	0,7527	0,6531

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Большинство НКА имеет срок службы, согласно паспортным данным, равный, не менее 8-10 лет. Результаты статистических данных при определении основных параметров надежности свидетельствуют, что при достижении аппаратом срока эксплуатации 3-5 лет  $P(t)$  снижается до значения 0,85, что требует замены аппарата. Погрешность от неучета поправочных коэффициентов при этом составляет 20% при определении  $\lambda(t)$  и  $P(t)$ , при определении  $Q(t)$  погрешность равна, примерно, 17%.

### **Заключение (Conclusions)**

Проведенные исследования показывают, что при наблюдаемых фактических режимах эксплуатации НКА необходим контроль их технического состояния, а также своевременная замена или ремонт до появления первых отказов. На предприятиях промышленной отрасли необходимо повышать уровень автоматизации процессов контроля качества и надежности контактов. Полученные результаты следует учитывать при составлении графиков планово-предупредительного ремонта.

Наиболее точным методом исследования параметров надежности НКА в зависимости количества цикла коммутации контактов является графико-аналитический метод с учетом поправочных коэффициентов. Неучет поправочных коэффициентов приводит к погрешности до 20,6% при определении  $\lambda(k)$ , до 10% при определении  $P(k)$  и 16,9% при определении  $Q(k)$ .

Проведенное исследование показывает, что паспортный ресурс циклов коммутации аппаратов не всегда совпадает с эксплуатационным значением циклов коммутации.  $P(k)$  исследуемых НКА после использования 25% ресурса коммутации снижается до 0,85, что, согласно ГОСТ 12434-83, является недопустимым уровнем значения  $P(k)$  и требует замены аппарата.

Одним из методов определения параметров надежности НКА является уточнение числа циклов коммутации при котором наблюдается снижение паспортного значения вероятности времени безотказной работы. При этом предлагается учитывать физические процессы в контактах, а также проводить анализ статистических данных об отказах НКА.

### **Литература**

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Логачева А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):3-13.
2. Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В. К вопросу оценки надежности электроснабжения в структурно-сложных распределительных электрических сетях // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. №7. С. 125-133.
3. Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В. Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радицентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 204- 227. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.
4. Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р., Алимова А. Н. Надежность и компоновка низковольтных распределительных устройств внутрицехового электроснабжения // Вестник КГЭУ. 2019. №1 (41). С. 3-9.
5. Ершов С. В., Демьянов Д. В. Построение математических моделей надежности системы электроснабжения предприятия // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №12-1. С. 118-125.
6. Аполлонский С.М. Методика опытного определения восстанавливающейся прочности / С.М. Аполлонский, Ю.В. Куклев // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 235-239. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.235.
7. Петров А. Р. и др. Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутривзаводских электрических сетях. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.
8. Гулин С.В., Пиркин А.Г. Комплексный подход к оценке эффективности сложного электротехнологического оборудования на предприятиях АПК // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2 (67). – С. 145-154. doi: 10.24412/2078-1318-2022-2-145-154.
9. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.
10. E. I. Gracheva, O. V. Naumov, A. V. Beloglazov, A. N. Gorlov and M. A. Mikhaylov, "Modeling the Reliability Characteristics of Contact Devices of Low-Voltage Grid," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, Russia, 2020, pp. 84-87, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281197.
11. W. Zhang, L. Qin, Y. Zhou, C. Yi and S. Li, "Reliability Assessment of Medium and Low Voltage Distribution Networks Considering Distributed Energy Sources," 2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), Dali, China, 2023, pp. 271-275, doi: 10.1109/EEPS58791.2023.10257168.

12. N. Zhu, G. Zhai and Z. Guo, "Research on Contact Reliability Design of Electrical Connector Contact," 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Zhangjiajie, China, 2019, pp. 155-160, doi: 10.1109/QR2MSE46217.2019.9021171.
13. Y. Lozanov, "Assessment of the Technical Condition of Electric Contact Joints Using Thermography," 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503060.
14. L. Hui, Z. Chen, F. Guo and G. Sun, "Modeling of the Friction Force in Sliding Electrical Contact with Mining Rules," 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, USA, 2018, pp. 61-65, doi: 10.1109/HOLM.2018.8611778.
15. V. Romanov, A. Kazantsev and A. Batishchev, "Reducing Transient Resistance in Contact Connections of Electrical Installations in Oil Industry," 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 75-79, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906745.
16. Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
17. K. Li *et al.*, "Electrical Performance Degradation Model and Residual Electrical Life Prediction for AC Contactor," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 400-417, March 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.2966516.
18. Andrușcă M., Adam M., Burlica R., Munteanu A. [et al.]. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). Iasi, Romania, 2016. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
19. Călin M. D., Helerea E. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips // International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). Bucharest, Romania, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
20. Deac C. N., Adam M., Andrușcă M., Dragomir A. Aspects regarding contact resistance measurement // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
21. Gheorghită C. M., Adam M., Andrușcă M., Munteanu A. [et al.]. About contact resistance of the electrical equipment // International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
22. Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
23. Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
24. Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // 5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
25. Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
26. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014). Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.
27. Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
28. Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
29. Ye Z., Liu S., Zhao S. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

30. Луцкий В. А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: справочное издание / В. А. Луцкий. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев : Наук.думка, 1966. - 208 с.

#### Авторы публикации

**Петров Алмаз Радикович** – аспирант Казанского государственного энергетического университета. ORCID\*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru.

**Грачева Елена Ивановна** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru.

**Абдуллазянов Эдвард Юнусович** – канд.техн. наук., ректор Казанского государственного энергетического университета.

#### References

1. Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Logacheva A.G. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):3-13. (In Russ.)
2. Voronin A.E., Peshekhonov N.E., Rybakov V.V. On the issue of assessing the reliability of power supply in structurally complex distribution electric networks. *Izvestiya Tula State University, Technical sciences*, 2020, no. 7, pp. 125-133. (In Russ.)
3. Budko P. A., Golyunov M. V., Allakin V. V. Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 204-227. (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.
4. Gracheva, E. I., Sadykov, R. R., Khusnutdinov, R. R., Alimova, A. N. Reliability and component of low-voltage displaying devices of internal electrical supply. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2019. 11(1(41)), pp. 3–9. (In Russian).
5. Ershov S. V., Demyanov D. V. Construction of mathematical models of reliability of the enterprise power supply system. *Izvestiya Tula State University, Technical sciences*, 2017, no. 12-1, pp. 118-125. (In Russ.).
6. Apollonsky S.M., Kuklev Y.V. Method of Restoring Strength Determination Test. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol.224, p. 235-239. (In Russian).
7. Petrov, A. R. et al. 2024. Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 511–520. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.
8. Gulin, S.V. and Pirkin, A.G. (2022), "Integrated approach to evaluating the efficiency of complex electrotechnical equipment at AIC enterprises", *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol.67, no. 2, pp. 145-154, (In Russ), doi: 10.24412/2078-1318-2022-2-145-154.
9. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(2):68-77. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77>.
10. E. I. Gracheva, O. V. Naumov, A. V. Beloglazov, A. N. Gorlov and M. A. Mikhaylov, "Modeling the Reliability Characteristics of Contact Devices of Low-Voltage Grid," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, Russia, 2020, pp. 84-87, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281197.
11. W. Zhang, L. Qin, Y. Zhou, C. Yi and S. Li, "Reliability Assessment of Medium and Low Voltage Distribution Networks Considering Distributed Energy Sources," 2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), Dali, China, 2023, pp. 271-275, doi: 10.1109/EEPS58791.2023.10257168.
12. N. Zhu, G. Zhai and Z. Guo, "Research on Contact Reliability Design of Electrical Connector Contact," 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Zhangjiajie, China, 2019, pp. 155-160, doi: 10.1109/QR2MSE46217.2019.9021171.
13. Y. Lozanov, "Assessment of the Technical Condition of Electric Contact Joints Using Thermography," 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503060.
14. L. Hui, Z. Chen, F. Guo and G. Sun, "Modeling of the Friction Force in Sliding Electrical Contact with Mining Rules," 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, USA, 2018, pp. 61-65, doi: 10.1109/HOLM.2018.8611778.

15. V. Romanov, A. Kazantsev and A. Batishchev, "Reducing Transient Resistance in Contact Connections of Electrical Installations in Oil Industry," *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 75-79, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906745.
16. Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
17. K. Li *et al.*, "Electrical Performance Degradation Model and Residual Electrical Life Prediction for AC Contactor," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 400-417, March 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.2966516.
18. Andrușcă M., Adam M., Burlica R., Munteanu A. [et al.]. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. Iasi, Romania, 2016. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
19. Călin M. D., Helerea E. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips // *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. Bucharest, Romania, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
20. Deac C. N., Adam M., Andrușcă M., Dragomir A. Aspects regarding contact resistance measurement // *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
21. Gheorghită C. M., Adam M., Andrușcă M., Munteanu A. [et al.]. About contact resistance of the electrical equipment // *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
22. Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
23. Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
24. Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // *5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
25. Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
26. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // *The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014)*. Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.
27. Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // *4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
28. Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
29. Ye Z., Liu S., Zhao S. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // *IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.
30. Lutskiy V. A. Calculation of reliability and efficiency of radio-electronic equipment [Text]: reference edition / V. A. Lutskiy. - 2nd ed., rev. and supplement. - Kiev: Nauk.dumka, 1966. - 208 pp.

#### **Authors of the publication**

**Almaz R. Petrov** – Kazan State Power Engineering University. ORCID\*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petrovall3@mail.ru.

© Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю.

**Elena I. Gracheva** – Kazan State Power Engineering University. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. [gracheva.i@bk.ru](mailto:gracheva.i@bk.ru).

**Edvard Yu. Abdullazyanov** – Kazan State Power Engineering University.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

**Получено** **24.02.2025 г.**

**Отредактировано** **03.03.2025 г.**

**Принято** **27.03.2025 г.**



## ОБНАРУЖЕНИЕ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА ПРИМЕРЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ АДАПТАЦИИ

Шарыгин М.В., Джериу Ахмед Сахиб Наджи, Альшахери Аммар Муса Абдулхасан

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Ниžний Новгород, Россия  
ahmed\_6891@yahoo.com

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. На эффективность и надежность системы релейной защиты (РЗ) влияет много факторов, такие как: отказ силового выключателя, отказ элементов устройства релейной защиты, погрешности работы измерительного тока и т.д. Подобные отказы сейчас приводят к отказу защиты в целом или к неправильному действию защиты и, при возникновении короткого замыкания (КЗ), часто к повреждению защищаемого объекта. Поэтому разработка более совершенных методов обнаружения отказов элементов РЗ является актуальной. ЦЕЛЬ. Целью статьи является: проведение краткого анализа проблемы надежности работы системы РЗ при отказе элементов защиты, разработка нового алгоритма работы устройств продольной дифференциальной РЗ с функцией обнаружения отказа трансформатора тока (ТТ) любого плеча защиты, а также распознавания режима электросети. Предлагаемый алгоритм позволяет выполнять адаптацию РЗ при обнаружении отказа ТТ в каждом такте времени, и таким образом повысить надежность системы защиты. МЕТОДЫ. Алгоритм разработан на основе методов математической логики. Устройства защиты используют межподстанционные информационные каналы связи между смежными устройствами. Устройства защиты имеют возможность автоматически адаптировать свой алгоритм работы к возникшему отказу, реконфигурировать зоны защиты. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье выполнен анализ проблемы, разработан алгоритм автоматического обнаружения отказов трансформатора тока и токовых цепей релейной защиты, основанный на первом законе Кирхгофа и использующий межподстанционную информационную сеть. Предложенный алгоритм позволяет не только однозначно обнаружить эти отказы, но и произвести мгновенную адаптацию зон дифференциальной релейной защиты при необходимости сохранения быстродействия релейной защиты. Алгоритм протестирован программой PSCAD/EMTDC на примере дифференциальной защиты шин. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В результате исследования получены результаты, которые можно использовать для повышения надежности системы цифровой РЗ при отказах элементов защиты.

**Ключевые слова:** релейная защита; надежность электроснабжения; дифференциальная защита; трансформатора тока; короткое замыкание.

**Для цитирования:** Шарыгин М.В., Джериу Ахмед Сахиб Наджи, Альшахери Аммар Муса Абдулхасан. Обнаружение отказов элементов цифровой релейной защиты на примере дифференциально-логической защиты и возможности ее адаптации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 53-68. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-53-68.

## DETECTION FAILURE ELEMENTS IN DIGITAL RELAY PROTECTION USING THE EXAMPLE OF DIFFERENTIAL LOGIC PROTECTION AND THE POSSIBILITY OF ADAPTIVE PROTECTION

Sharygin M.V., Jerryo Ahmed Sahib Naji, Alshaheri Ammar Mousa Abdulhasan

Nizhny Novgorod State Technical University named R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia  
ahmed\_6891@yahoo.com

**Abstract:** RELEVANCE. The efficiency and reliability of the relay protection system is influenced by many factors, such as: failure of the power switch, malfunction of the relay protection device components, errors in the operation of the current measurement, etc. These failures can lead to a complete failure of the protection system or incorrect protective action

and, in the case of a short circuit, often result in damage to the protected object. Therefore, the development of more advanced methods for detecting failures in the protection system elements is crucial. **THE PURPOSE.** The purpose of the article is to briefly analyze the problem of reliability in relay protection system in the event of a failure of protection elements, develop a new algorithm for the operation of longitudinal differential relay devices that detects current transformer failure (CT) on any side protected element, and recognizes network mode. The proposed algorithm allows relay protection devices to adapt when a CT failure is detected in each cycle, thus increasing the reliability of the protection system. **METHODS.** The algorithm is developed using mathematical logic methods. Protection devices utilize inter-station communication channels to exchange information with adjacent devices. Additionally, these devices automatically adapt their operating algorithm to the type failure that occurs, and reconfigure protection zones accordingly. **RESULTS.** The article examines the problem, and develops an algorithm for the automatic detection of failures in current transformer and relay protection circuits. This algorithm is based on Kirchhoff's first law and utilize an inter-substation information network. The proposed algorithm not only enables the unambiguous detection of such failures, but also allows for the instant adaption of differential relay protection zones when necessary, ensuring the speed relay protection is maintained. The algorithm has been validated through testing in the PSCAD/EMTDC program using a case study of busbar differential protection. **CONCLUSION.** As a result of the research, significant findings have been obtained that can be enhance the reliability of the digital relay protection system in the event of failures in protection elements.

**Keywords:** relay protection; reliability of power supply; differential protection; current transformer; short circuit.

**For citation:** Sharygin M.V., Jeryo Ahmed Sahib Naji, Alshaheri Ammar Mousa Abdulhasan. Detection failure elements in digital relay protection using the example of differential logic protection and the possibility of adaptive protection. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3):53-68. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-53-68.

### **Введение (Introduction)**

Система релейной защиты (РЗ) - это вспомогательная подсистема электрической системы, которая должна обнаруживать и отключать короткие замыкания (КЗ) при их возникновении. Система РЗ должна обеспечивать селективное, чувствительное и наивозможно быстрое отключение при всех вариантах событий КЗ. КЗ являются редкими случайными событиями. А также неправильная работа релейной защиты из за отказавшегося трансформатора тока часто приводит к нежелательному отключению электроснабжения потребителей.

Законы распределения параметров режима электросети при КЗ имеют значительную дисперсию и накладываются с законами распределения допустимых режимов, что значительно затрудняет обнаружение КЗ и делает систему РЗ весьма сложной [1]. Устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) проектируются и являются по факту высоконадежными устройствами. Это обусловлено важностью системы РЗА, от правильной работы которой сильно зависит надежность электроснабжения потребителей.

Тем не менее устройства РЗА, выключатели, измерительные трансформаторы напряжения (ТН) и тока (ТТ) могут отказать с ненулевой вероятностью. Если эти отказы вовремя не устранить, то это приведет к частичному отказу системы РЗА: отказу отдельных защит и автоматики. Часть отказов обнаруживается заранее, до возникновения коротких замыканий (КЗ) с помощью различных технических средств, методов, диагностики, мониторинга, системы периодического технического обслуживания [2-6].

Однако в традиционной системе РЗА существенная часть отказов выключателей, устройств защиты, измерительных трансформаторов и их трактов связи обычно обнаруживаются лишь по факту их отказа, т.е. по неправильному действию, срабатыванию устройств РЗА. Это может повлечь повышенный уровень ущербов при ликвидации КЗ, например, из-за отключения большего количества нагрузок, увеличения длительности отключения, асинхронного хода генераторов, повреждения силового оборудования, каскадного развития аварии.

С развитием цифровых систем связи и устройств в электросетях существует возможность обнаруживать некоторые из отказов элементов системы РЗА заранее, после чего могут быть быстро приняты необходимые мероприятия для восстановления или адаптации системы РЗА к будущим КЗ с учетом обнаруженных отказов. Очевидно, что в некоторых случаях мероприятия могут быть приняты автоматически, к этому и нужно стремиться.

Большинство работ посвящено мониторингу и оценке надежности отдельных устройств РЗА, а также методам и способам ее повышения на аппаратном уровне [2-4].

Однако надежность РЗА можно повышать и на системном уровне, если рассматривать совокупность устройств РЗА как единую систему [5]. При таком взгляде, отказ одного или нескольких устройств РЗА может приводить к полному или частичному отказу системы РЗА, а может и не приводить, если при проектировании системы РЗА это учтено и на этот случай предусмотрена избыточность, резерв [7].

Очевидно, что увеличение надежности РЗА на системном уровне не менее важно, чем на аппаратном [9]. Поэтому уже давно существуют хорошо зарекомендовавшие себя технические решения: логика резервирования отказов выключателей (УРОВ), дальнейшее резервирование защит с помощью медленных ступеней защит относительной селективности, ближнее резервирование дополнительными комплектами защиты, блокировки защит при отказе их измерительных трансформаторов. Эти решения значительно увеличивают надежность системы РЗА на системном уровне, но, однако, имеют и недостатки:

- почти все эти мероприятия приводят к замедлению отключений, что весьма критично с точки зрения обеспечения устойчивости, например, вращающихся электрических машин, нагрузки,
- чувствительность резервных защит почти всегда хуже основных защит,
- как и любые другие технические системы, эти устройства тоже имеют ненулевую вероятность отказа,
- существующие решения распознают далеко не все отказы и не всех элементов системы РЗА.

И вот на эти случаи никаких мероприятий, резервов, избыточности не предусматривается.

В последнее время принимаются решения о создании автоматизированных систем мониторинга отказов устройств РЗА и их измерительной части. Хотя данные системы очень важны, но они пока позволяют лишь отслеживать параметры надежности, «мониторить» их, а не принимать решения об адаптации системы РЗА в автоматическом режиме.

Необходимо отметить, что, несмотря на широкое внедрение микропроцессорных устройств РЗА за последние 30 лет, в эксплуатирующихся организациях [2] отмечается недостаточный уровень автоматизации процессов мониторинга, диагностики, анализа отказов РЗА, большое влияние на это человеческого фактора. Кроме того, отмечается отсутствие стандартизации устройств РЗА, их алгоритмов, что еще больше отягощает проблему человеческого фактора.

Цель исследования заключается в повышении надежности и эффективности системы релейной защиты за счет обнаружения отказов элементов самой защиты, а также разработке методов автоматической адаптации защиты к таким отказам.

Научная значимость исследования состоит в том, что в работе цифровой дифференциальной защиты впервые использованы сигналы смежных защит логические сигналы смежных защит, что позволяет выполнить однозначное обнаружение событий отказов измерительных трансформаторов тока плеч защит.

Практическая значимость исследования заключается в повышении надежности системы защиты сети при отказах ее элементов (трансформаторов тока, реле), сохранении быстродействия РЗ за счет автоматической адаптации зон защиты.

#### **Предварительный теоретический анализ проблемы.**

Цифровизация устройств РЗА и внедрение систем информационного обмена в электросетях потенциально позволяет более точно распознать все возможные отказы элементов системы РЗА, отделить их от текущих режимов электросети. А затем оценить последствия отказов с учетом ожидаемых режимов и возможных вариантов действий, что позволит реализовать оптимальные мероприятия, например, адаптацию системы РЗА.

Существуют следующие наиболее частые, вероятные события режимов электросети, которые должны обнаруживаться системой РЗА в каждый момент времени:

- 1) группа допустимых режимов:
  - 1.1) установившийся нормальный режим,
  - 1.2) режим пуска,
  - 1.3) режим качаний,
  - 1.4) послеаварийный режим,
  - 1.5) прочие допустимые режимы,
- 2) группа недопустимых режимов,
  - 2.1) КЗ в зоне защиты,
  - 2.2) КЗ вне зоны защиты,
  - 2.3) асинхронный ход,

2.4) прочие недопустимые режимы.

На эти всевозможные режимы электросети могут накладываться события различных отказов элементов системы РЗА:

- 1) обнаруживаемый заранее отказ ТТ, ТН, канала связи, ИЭУ, выключателя, с помощью системы самодиагностики ;
- 2) не обнаруживаемый заранее отказ устройств ТТ, ТН, канала связи, ИЭУ, выключателя. Отказ обнаруживается только в момент неправильного срабатывания РЗА;
- 3) отказ ТТ или его канала связи, обнаруживаемый по дифференциальному признаку. Этот метод обнаружения отказов рассматривается далее в статье,
- 4) отказы цифровых элементов РЗА из-за кибератак, в том числе из-за подмены информационных сигналов,
- 5) прочие отказы.

Эти события отказов могут произойти одновременно или в разное время, а также с некоторой вероятностью могут накладываться друг на друга.

Часть отказов самих устройств РЗА, блоков управления выключателей могут быть обнаружены их собственными внутренними системами самодиагностики. Для передачи информации об этих отказах в протоколе МЭК61850 предусмотрены соответствующие сигналы [8]. Однако системы самодиагностики электронных устройств опираются на информацию только от различных аппаратных датчиков, расположенных на платах самих устройств [9] и далеко не все отказы устройств РЗА могут быть обнаружены. Например, невозможно заранее обнаружить отказы механической части выключателей, ошибочно заданные параметры срабатывания, ошибки алгоритма цифровых устройств.

Логика РЗА должна правильно обнаруживать все эти события отказов в любом сочетании с текущими событиями режима электросети. В результате система РЗА должна правильно определять совокупность событий:

- какой именно режим электросети существует в текущий момент времени,
- какие именно отказы возникли в системе РЗА.

Для правильно и точного обнаружения отказов и режимов необходимо:

- использовать всю доступную информацию в виде сигналов, измерений ТТ, ТН в текущий момент времени, а также в предыдущие моменты [10],
- использовать надежные научные методы обнаружения. Авторы считают, что для этой цели, например, хорошо подходят методы статистического анализа .

После обнаружения отказов, системе РЗА необходимо решить: что нужно предпринять (рис.1)? Какие действия должны быть выполнены при обнаружении определенной группы событий с целью достижения нужного оптимального результата? Группа событий может быть любой.

Возможные действия системы РЗА:

- 1) продолжение дежурства (ожидание, бездействие),
- 2) отключение своих силовых выключателей
  - 2.1) мгновенное отключение,
  - 2.2) отключение с выдержкой времени,
- 3) действие на резервные выключатели (например, с помощью УРОВ),
- 4) вывод из работы, блокировка отказавшей РЗ фидера,
- 5) адаптация защит, реконфигурация зон защиты,
- 6) подмена измерений отказавшего ТТ, ТН,
- 7) действие на сигнал,
- 8) прочие действия.

Эти действия могут выполняться отдельно или совместно различными устройствами РЗА.

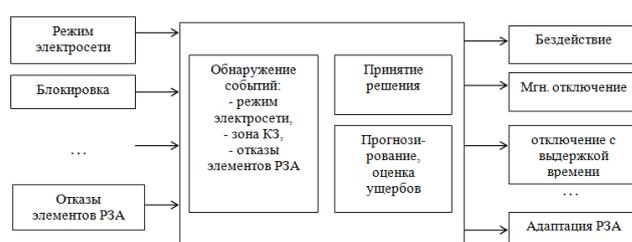


Рис. 1. Общая схема оптимального принятия решений в системе РЗА с учетом обнаружения отказов элементов РЗА и последующей адаптации

Fig. 1. General scheme of optimal decision-making in the protection system, taking into account the detection of failures of the protection elements and subsequent adaptation

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Необходимо отметить, что спектр возможных действий РЗА весьма широк, а точность обнаружения событий пока весьма мала, поэтому достижение оптимальности является сложной задачей, для решения которой необходимо использовать не только традиционные алгоритмы РЗА, но и совершенно новые алгоритмы принятия решений [7,11]. В составе цифровой РЗА возможно создание новой автоматики обнаружения отказов элементов РЗА (АОРЗ) и адаптации к ним с учетом режимных и прочих внешних условий (ААРЗ), осуществляющей не только непрерывный мониторинг РЗА, но и принятие автоматических решений по адаптации к отказам. Это существенно увеличит надежность системы РЗА. За счет широкого внедрения цифровых устройств РЗА и систем цифровой связи уже имеется необходимый объем информационных сигналов и средств вычислений для создания такой новой автоматики.

Полный набор алгоритмов автоматики еще предстоит создать, в данной статье предлагается один из вариантов алгоритма обнаружения отказа ТТ РЗА и(или) его цепей с возможностью последующей адаптации зон защиты цифровой РЗ.

#### **Материалы и методы (Materials and methods).**

#### **Предлагаемый алгоритм обнаружения отказа ТТ и токовых цепей.**

Обнаружение отказа ТТ и их цепей с помощью первого закона Кирхгофа можно основывать как на информации от группы ТТ одного фидера – балансом токов фазных ТТ и фильтра токов нулевой последовательности [8], так и на информации от внешних ТТ, расположенных на другом присоединении или даже ПС – балансом токов по участку электросети [12]. Второй вариант представляется наиболее удачным, поскольку отказ сразу нескольких ТТ на разных фидерах разных ПС значительно менее вероятен.

Предлагаемый алгоритм обнаружения отказа ТТ и токовых цепей основан на постоянном сравнении действий продольных дифференциальных защит (срабатываний-несрабатываний) в зоне слева от конкретного ТТ, справа от него и в объединенной «общей» зоне (рис. 2).

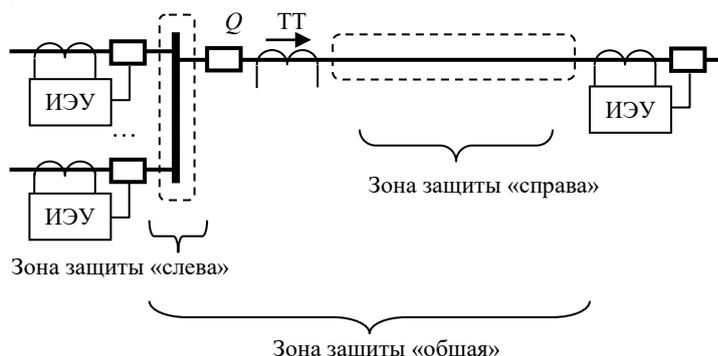


Рис. 2. Пример однолинейной схемы электросети с разбиением на элементарные зоны защиты относительно конкретного ТТ Fig. 2. An example of a single-line electrical network circuit divided into elementary protection zones relative to a specific CT

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

В таблице 1 показаны все возможные сочетания срабатываний/несрабатываний защит этих зон. Рассматриваемый ТТ в центре входит в состав расчета балансов токов двух дифференциальных зон одновременно. Исходя из таблицы 1, можно распознавать сочетания 1, 4, 6 и 7. Все сочетания, кроме №7, не позволяют однозначно отделить события режима от событий отказа – они возникают и при отказе ТТ, и при КЗ.

Но сочетание № 7 позволяет однозначно распознать отказ центрального ТТ или его измерительного тракта в любом режиме, в том числе и в нормальном режиме, до возникновения КЗ. Эта возможность позволит в дальнейшем и адаптировать защиту к будущим КЗ с учетом отказа ТТ.

Вероятность одновременного возникновения двух КЗ в двух соседних зонах (в правой и в левой зонах данного ТТ) одновременно с отказом ТТ в центре, очень мала (сочетание №8 в таблице 1). Остальные сочетания в таблице 1 не существуют в условиях предлагаемого алгоритма.

Логика срабатывания зон защиты и соответствующие ей режимы  
The logic of activation of protection zones and the corresponding modes

№	Зоны защиты			Событие	
	«Левая»	«Правая»	«Общая»	КЗ в зонах защиты	Повреждение измерительного тракта зоны защиты
1	0	0	0	Нормальный режим	Нормальный режим
2	0	0	1	Режим не определен	Режим не определен
3	0	1	0	Режим не определен	Режим не определен
4	0	1	1	КЗ в «правой» зоне защиты	Отказ измерительного тракта смежных трансформаторов тока «правой» зоны защиты
5	1	0	0	Режим не определен	Режим не определен
6	1	0	1	КЗ в «левой» зоне защиты	Отказ измерительного тракта смежных трансформаторов тока «левой» зоны защиты
7	1	1	0	Режим не определен	Отказ измерительного тракта общего трансформатора тока
8	1	1	1	КЗ в «левой» и «правой» зонах защиты	Отказ измерительного тракта трансформаторов тока «левой», «правой» смежных зон защиты или общего на фоне КЗ в «правой» или «левой» зонах защиты

Примечание: 0 – несрабатывание, 1 – срабатывание

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

На рисунке 3 изображена блок-схема основного алгоритма распознавания режима электросети в зонах защиты и обнаружения отказа ТТ или его тракта в текущем времени. В алгоритме используются дифференциальные токи с правой зоны, левой зоны и в центре. Так же для работы и запуска алгоритма необходима информация о состоянии измерительных ТТ и их трактов справа, слева с предыдущего такта времени (блок 1). Если хотя бы один ТТ был распознан как неисправный, то происходит переход на блок 3 – адаптация системы защиты к отказу соседних ТТ (рис. 5).

Алгоритм адаптации защиты при обнаружении отказа любого ТТ может выполнять одно из следующих действий:

- 1) традиционная блокировка устройств РЗА, чьи ТТ отказали. Отключение КЗ будет происходить медленными резервными защитами,
- 2) при необходимости сохранения быстродействия, производится реконфигурация зон дифференциальных защит: слияние зон защиты за счет исключения неисправного ТТ и перерасчет параметров срабатывания для новых дифференциальных зон (рис. 5).

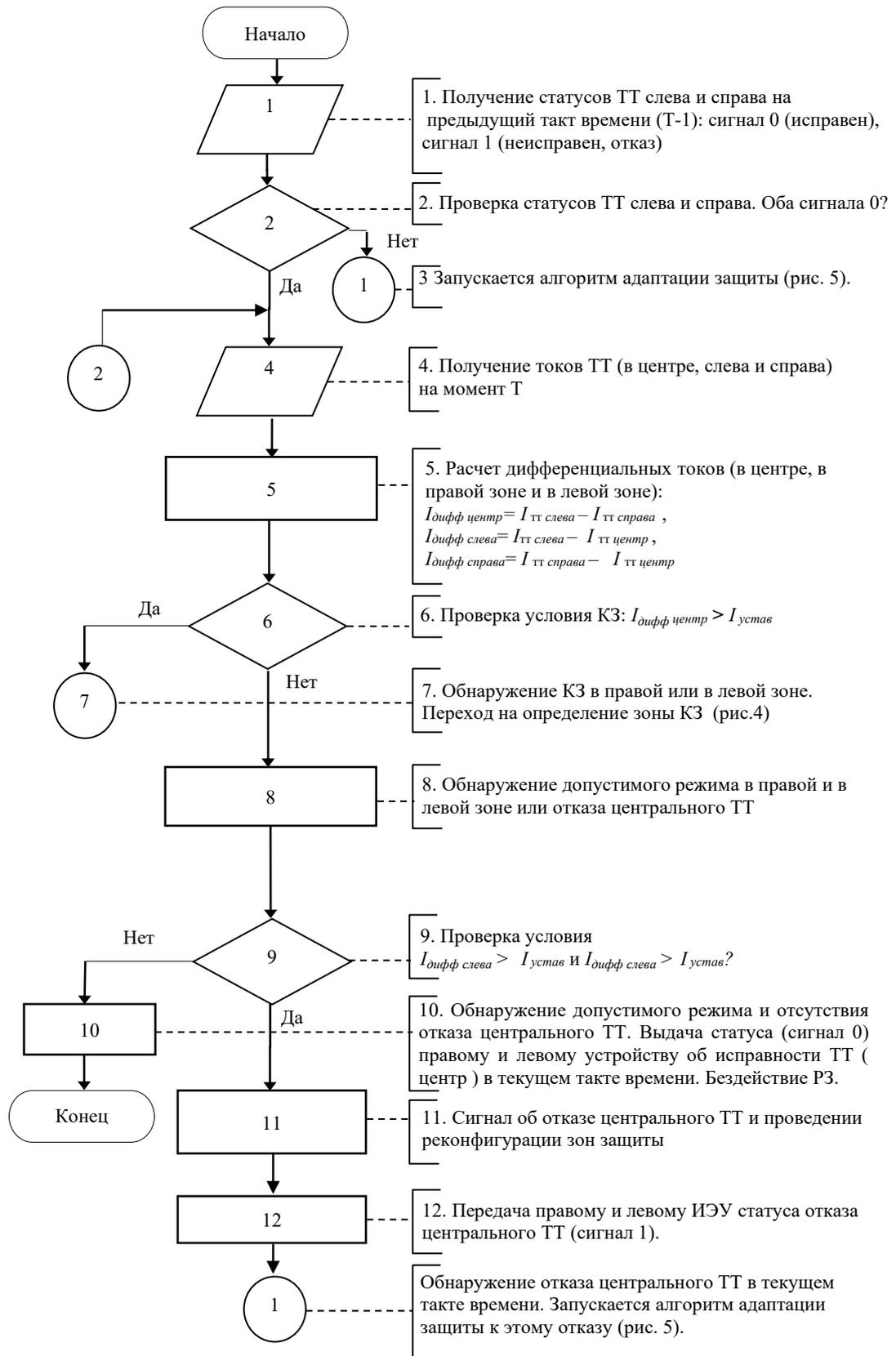


Рис. 3. Предлагаемый алгоритм дифференциально-логической защиты для цифровых ИЭУ, использующий обмен информацией между ИЭУ

Fig. 3. The proposed algorithm of differential logic protection for digital IEDs using information exchange between IEDs

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

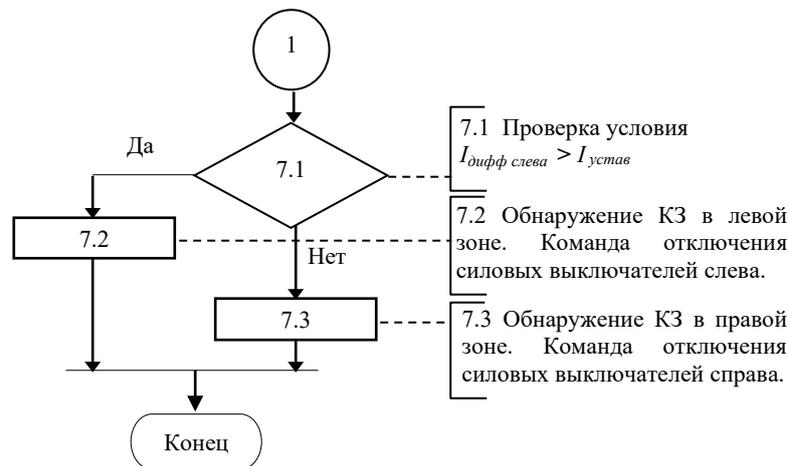


Рис. 4. Алгоритм определения зоны КЗ и его отключения Fig. 4. The algorithm for determining the short-circuit zone and isolating its

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

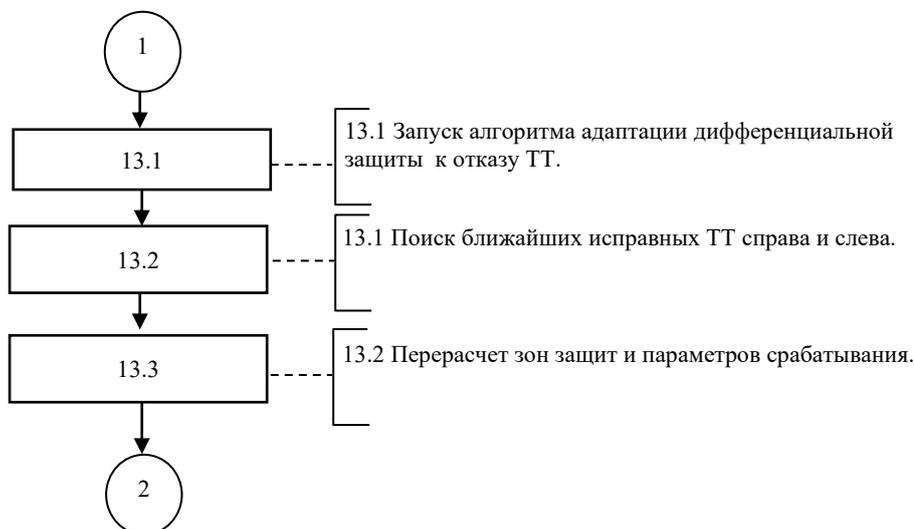


Рис. 5. Алгоритм адаптации ДЗ к отказу центрального ТТ за счет реконфигурации зон защиты Fig. 5. The DZ adaptation algorithm to the failure of the central TT due to the reconfiguration of protection zones

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

При этом быстродействующая дифференциальная защита продолжит работу, но при возникновении КЗ произойдет отключение всей объединенной зоны защиты.

Расчеты дифференциальных токов во всех 3 зонах ( $I_{\text{дифф справа}}$ ,  $I_{\text{дифф слева}}$  и  $I_{\text{дифф центр}}$ ) выполняются блоком 5. Если  $I_{\text{дифф центр}}$  превышает ток срабатывания, то это означает возникновение КЗ в правой или в левой зоне и требуется действие РЗ, которая отключит КЗ в этой зоне (рисунок 4). Если значение  $I_{\text{дифф центр}}$  меньше тока срабатывания, то это означает, что существует нормальный режим в объединенной зоне или это может быть отказ ТТ в центре (блоки 8-13 на рис. 3 и на рис. 5).

Достоинством предложенного алгоритма, является то, что отказ центрального ТТ обнаруживается сразу после его возникновения, в том числе и в нормальном режиме.

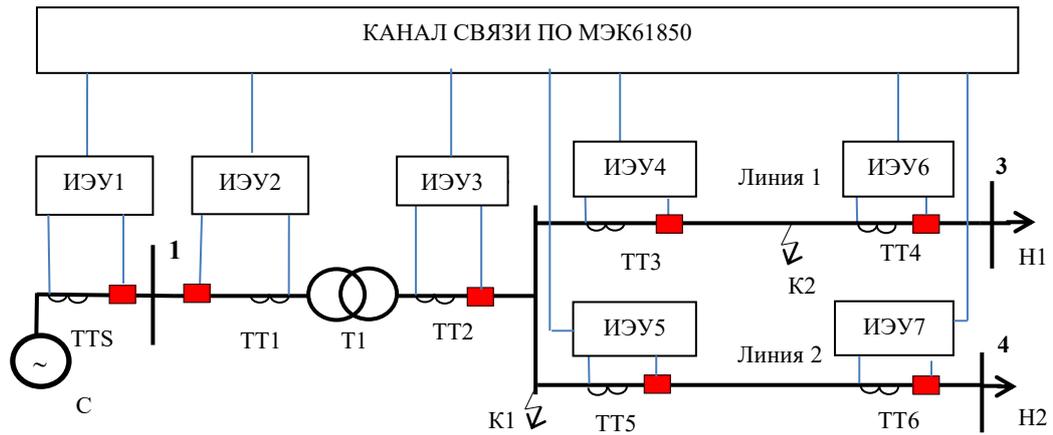
Предлагаемый алгоритм не использует напрямую SV потоки от всех ТТ, а основывается на битовых сигналах отказов ТТ дифференциальных защит смежных элементов электросети: ЛЭП, шин, силовых трансформаторов и т.д. Алгоритм является логической надстройкой над системой дифференциальных РЗ (ДЗ), каждая из которых производит контроль первого з-на Кирхгофа на своем локальном участке электросети [13].

### Результаты (Results)

#### Имитационное моделирование алгоритма обнаружения отказа ТТ и токовых цепей:

Рассмотрим пример электросети (её параметры указаны в табл. 2 и 3), показанный на рисунке 6. Электросеть имеет основной источник питания (С): эквивалентная система с номинальным напряжением 10 кВ, номинальной мощностью 25 МВА, и импедансом 4,36

Ом. Источник питания подключен к силовому трансформатору (Т1) мощностью 25 МВА, 10/115 кВ по шинопроводу.



Коэффициент трансформации ТТ: ТТS и ТТ1 = 1500/1 ; ТТ2 = 150/1; ТТ3, ТТ4, ТТ5 и ТТ6 =100/1  
Нагрузка : Н1 и Н2 , Предлагаемые места короткого замыкания : К1 и К2

Рис. 6. Пример однолинейной схемы электросети с установленными ИЭУ Fig. 6. An example of a single-line electrical grid with installed IEDs

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 2  
Table 2

Параметры силового трансформатора (Т1)  
Parameters of the power transformer (T1)

Тип	Sном, МВА	Пределы регулирования	Каталожные данные				Расчетные данные		
			$U_k, \%$	$\Delta P_x, \text{кВт}$	$P_x, \text{кВт}$	$I_x, \%$	$R_T, \text{Ом}$	$X_T, \text{Ом}$	$\Delta Q_x, \text{квар}$
ТДН-25000/110	25	$\pm 9 \cdot 1,78 \%$	10,5	120	27	0,7	2,54	55,9	175

Где  $U_k, \%$  — напряжение короткого замыкания в процентах от номинального высшего напряжения,  $\Delta P_k$ - потери (потери в меди) кВт,  $\Delta P_x$  — потери (потери в стали) холостого хода, кВт,  $I_x, \%$  ток холостого хода в процентах от номинального тока обмотки высшего напряжения.

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Таблица 3  
Table 3

Параметры воздушной линии электропередачи и нагрузки  
Overhead power line and load parameters

Название	Длина, км	Худ, Ом / км	Руд, Ом / км	Нагрузка		Номинальное напряжение, кВ
				P, МВт	Q, Мвар	
ЛЭП1	10	0,4	0,1	10	1,5	115
ЛЭП2	10	0,4	0,1	10	1,5	115

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

В нормальном режиме все токи, измеряемые ТТ, протекают в одном направлении от генератора к потребителям, а дифференциальный ток в каждой зоне меньше тока небаланса. В нормальном режиме напряжения во всех узлах имеют допустимый уровень: напряжение на шине 1 = 10 кВ, напряжение на шине 2 = 112,652 кВ и напряжение на шинах 3 и 4 = 112,504 кВ. Токи, протекающие во всех ветвях также допустимы: ток низкой стороны обмотки трансформатора = 1203А, ток высокой стороны обмотки трансформатора в сторону шин 2 = 105А, и токи нагрузки по линиям 1 и 2 равны 52А.

Согласно предложенному алгоритму, распознавание отказа некоторого  $i$ -го ТТ можно выполнить логическим путем – одновременным сравнением величин дифференциальных токов для нескольких зон защиты, в состав которых входит ток  $i$ -го ТТ. Например, для определения отказа ТТ2 (рисунки 6, 7) необходима информация от ТТ1, ТТ3, ТТ5. Согласно таблице 1 по сочетанию срабатываний дифференциальных защит 1-

трансформатора (левая зона), 2 - шины2 (правая зона) и 3 - в объединённой зоне (трансформатор и шина 2) (рисунок 7а) можно обнаружить, что ТТ2 исправен или ТТ2 отказал.

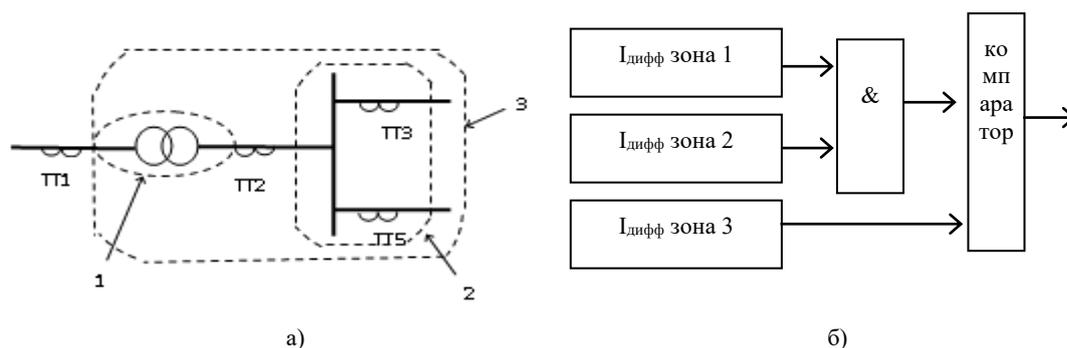


Рис. 7. Сегмент дифференциально-логической защиты вокруг ТТ2: а) дифференциальные зоны относительно ТТ2, б) логика обнаружения отказа ТТ2

Fig. 7. Segment of differential logic protection around CT2: a) differential zones relative to CT2, b) logic circuit detection failure CT2

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

Рассмотрим различные варианты сочетаний режимов электросети, событий КЗ и отказов. Анализ работы предложенного алгоритма выполнен с помощью имитационного моделирования в программе PSCAD.

**А. Моделирование последовательности событий: нормальный режим, затем отказ ТТ2 (рис. 8).**

Допустим, в нормальном режиме электросети происходит отказ ТТ2, установленного в фазе А (рисунок 8а, 8б). Алгоритм обнаруживает этот отказ (рисунок 8в), ИЭУ РЗ отправит сигнал смежным ИЭУ, установленным в правой и левой зонах. Рисунок 8в показывает действие алгоритма в этой ситуации.

Все случаи отказа ТТ2 моделировались заданным периодом времени: отказ возникает в 0,3 секунды после начала моделирования и длится 0,15 с.

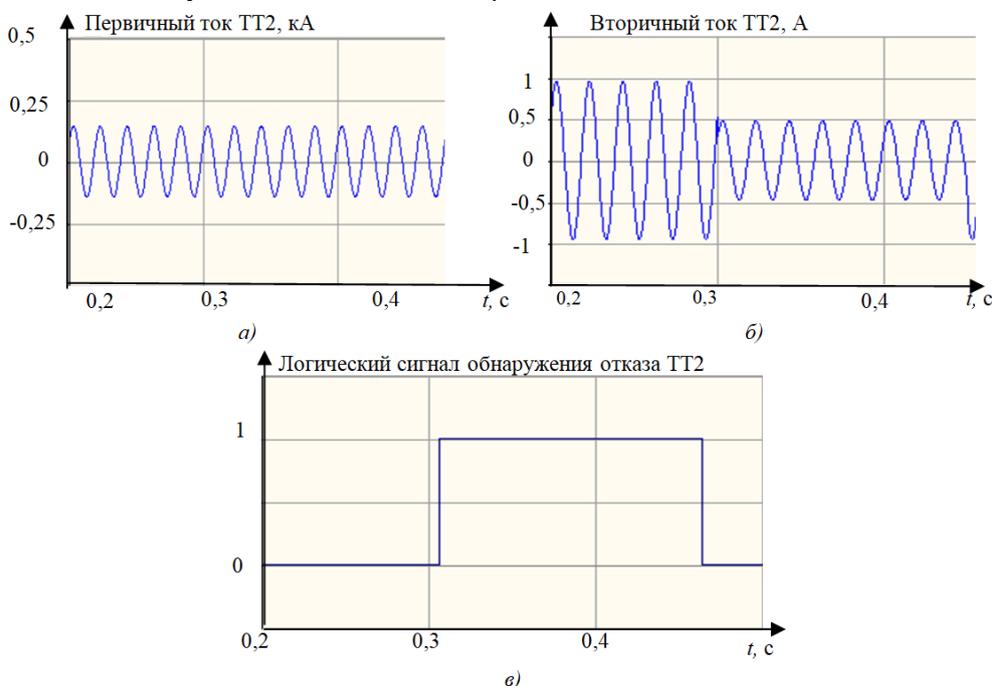


Рис. 8. - Моделирование нормального режима электросети с последующим возникновением отказа ТТ2: а) осциллограмма первичного тока ТТ2, б) осциллограмма вторичного тока ТТ2, в) осциллограмма логического сигнала обнаружения отказа ТТ2

Fig. 8. - Simulation the normal operation mode of the electrical network with the subsequent occurrence failure of CT2: a) oscillogram of the primary current CT2, b) oscillogram of the secondary current CT2, c) oscillogram of the logical signal for detecting failure CT2

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author

В традиционной защите отказ ТТ2 приведет к неправильному срабатыванию и ложному отключению, так как возникает дифференциальный ток ( $I_{дифф}$ ) в зоне шины и в зоне трансформатора выше, чем ток уставки (Ток торможения ( $I_{торм}$ )) (рисунок 9а, 9б). ИЭУ отключат все силовые выключатели обеих зон (рисунок 9в). Предложенный алгоритм позволяет обнаружить данный отказ и либо заблокировать защиту, либо адаптировать систему защиты посредством удаления отказавшего ТТ из логических цепей защит и реконфигурации зон защиты.

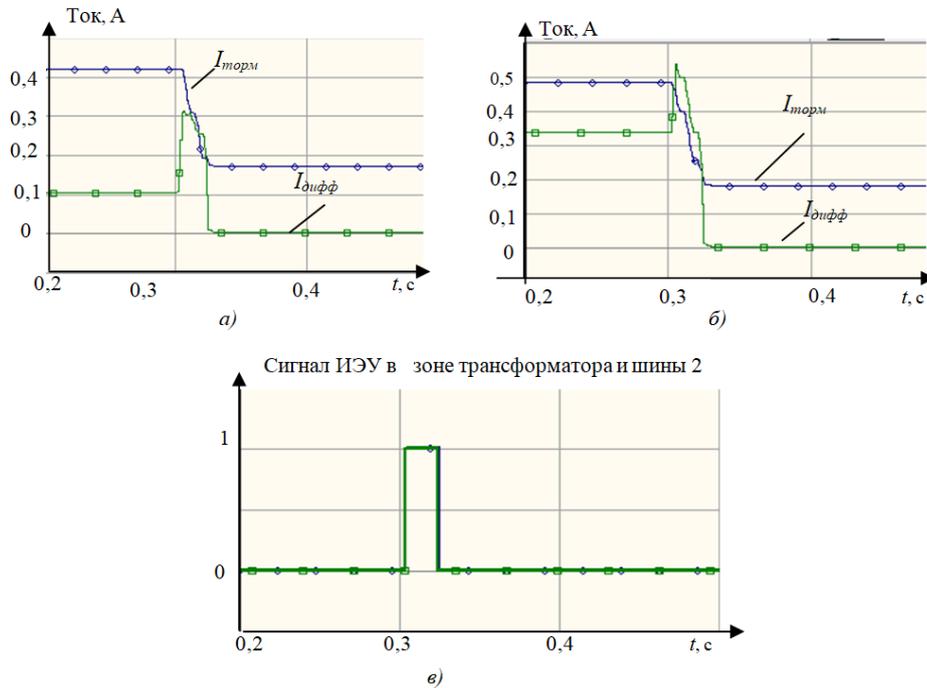


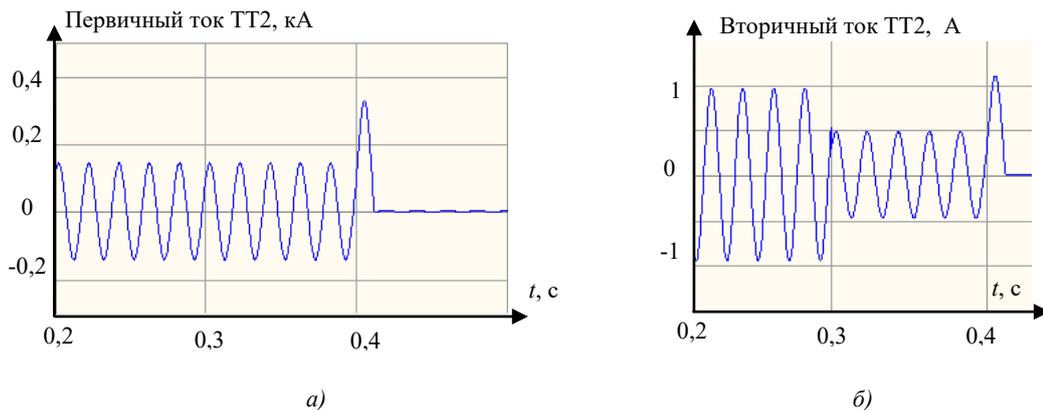
Рис. 9 - Моделирование нормального режима электросети с последующим возникновением отказа ТТ2 при отсутствии алгоритма обнаружения отказа ТТ: а) осциллограмма тока  $I_{дифф}$  и  $I_{торм}$  в зоне трансформатора, б) осциллограмма тока  $I_{дифф}$  и  $I_{торм}$  в зоне шины 2, в) действие ИЭУ в обеих зонах на отключение силовых выключателей

Fig. 9 - Simulation of the normal operation of the power grid with the subsequent occurrence failure CT2 in the absence of a CT failure detection algorithm: а) oscillogram the current  $I_{diff}$  and  $I_{torm}$  in the transformer zone, б) oscillogram the current  $I_{diff}$  and  $I_{torm}$  in the bus zone 2, в) the action of the IED in both zones to turn off the circuit breakers

\*Источник: составле но автором. \*Source: compiled by the author

### Б. Моделирование последовательности событий: нормальный режим, затем отказ ТТ2, затем адаптация защиты, затем КЗ в зоне шин 2.

Рассмотрим предыдущие события, но с учетом адаптации защиты. Пусть возникает сначала отказ ТТ2 (в момент 0,3 с). Затем предложенный алгоритм выявит отказ ТТ2 и система защиты реконфигурируется: объединятся зоны шин 2 и трансформатора в одну зону защиты. Объединенная зона защищается за счет измерений исправных ТТ: ТТ1, ТТ3, ТТ5. Пусть затем возникает КЗ в зоне шины 2 (К1) (рисунок. 6) в момент 0,4 с. В этом случае алгоритм защиты быстро отключит КЗ, но за счет отключения В1, В3, В5 (увеличенная зона защиты). Это целесообразно, если требуется быстрое отключение КЗ.



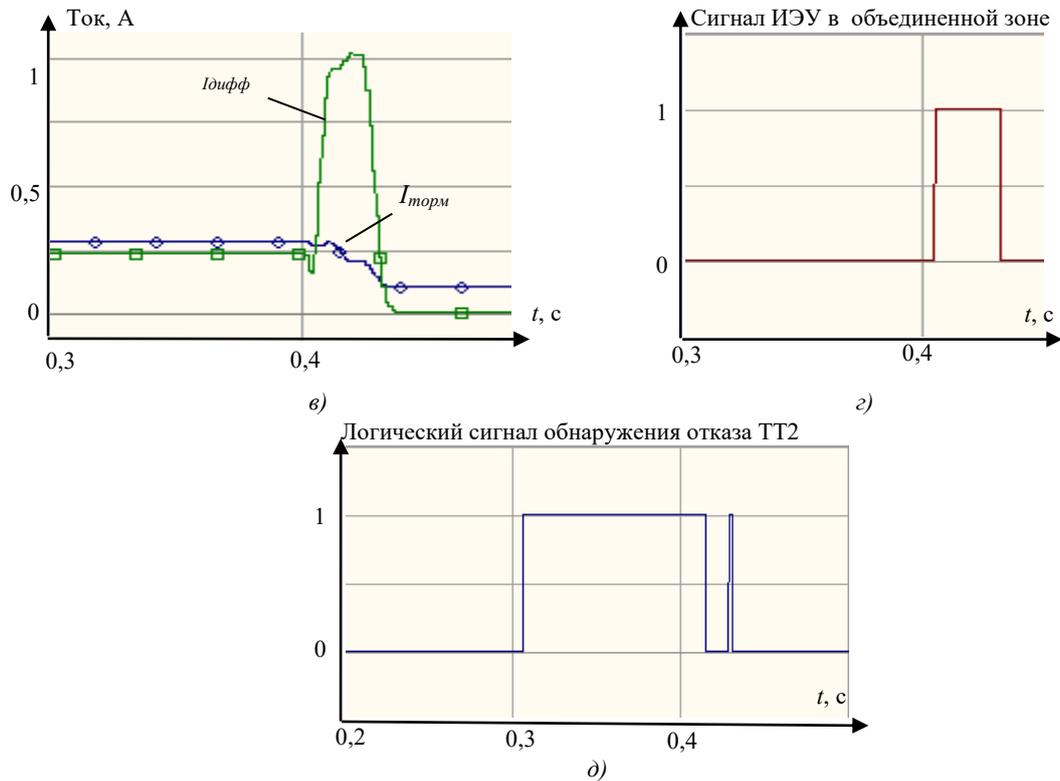
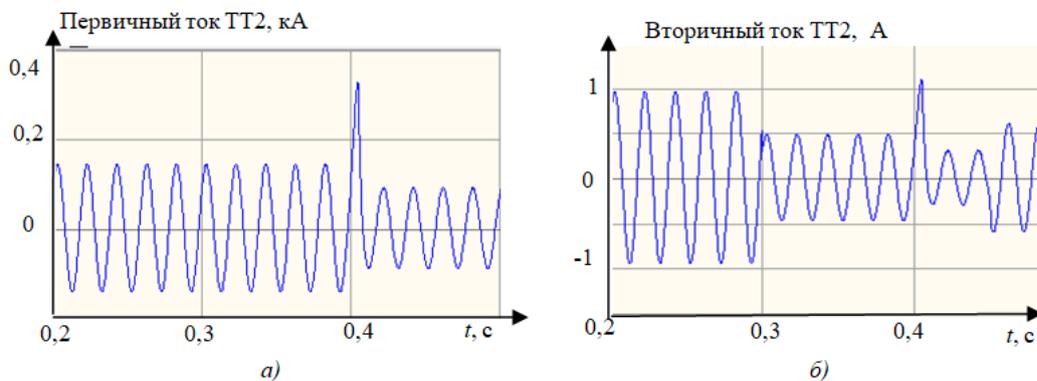


Рис.10 - Моделирование нормального режима электросети с последующим возникновением отказа ТТ2, а также КЗ в зоне шин 2 при работе алгоритма обнаружения отказа ТТ2: а) осциллограмма первичных токов ТТ2, б) осциллограмма вторичных токов ТТ2, в) осциллограмма  $I_{\text{торм}}$  и  $I_{\text{дифф}}$ , г) действие ИЭУ объединенной зоны на отключение, д) осциллограмма логического сигнала обнаружения отказа ТТ2

\*Источник: составле но автором. \*Source: compiled by the author

### В. Моделирование последовательности событий: нормальный режим, затем отказ ТТ2, затем адаптация защиты, затем КЗ в зоне линии 1.

Рассмотрим предыдущие события отказа ТТ2 так же с учетом адаптации защиты, но затем КЗ возникает в смежной зоне в линии 1 (К2 на рисунок 6). К2 в этом случае является внешним КЗ по отношению к зоне шин 2. РЗ, установленные с 2-х сторон линии 1, должны выполнить отключение своих выключателей и на их работу не оказывает влияния отказавший ТТ2 (рисунок 11).



Ток, А

Сигнал ИЭУ в объединенной зоне

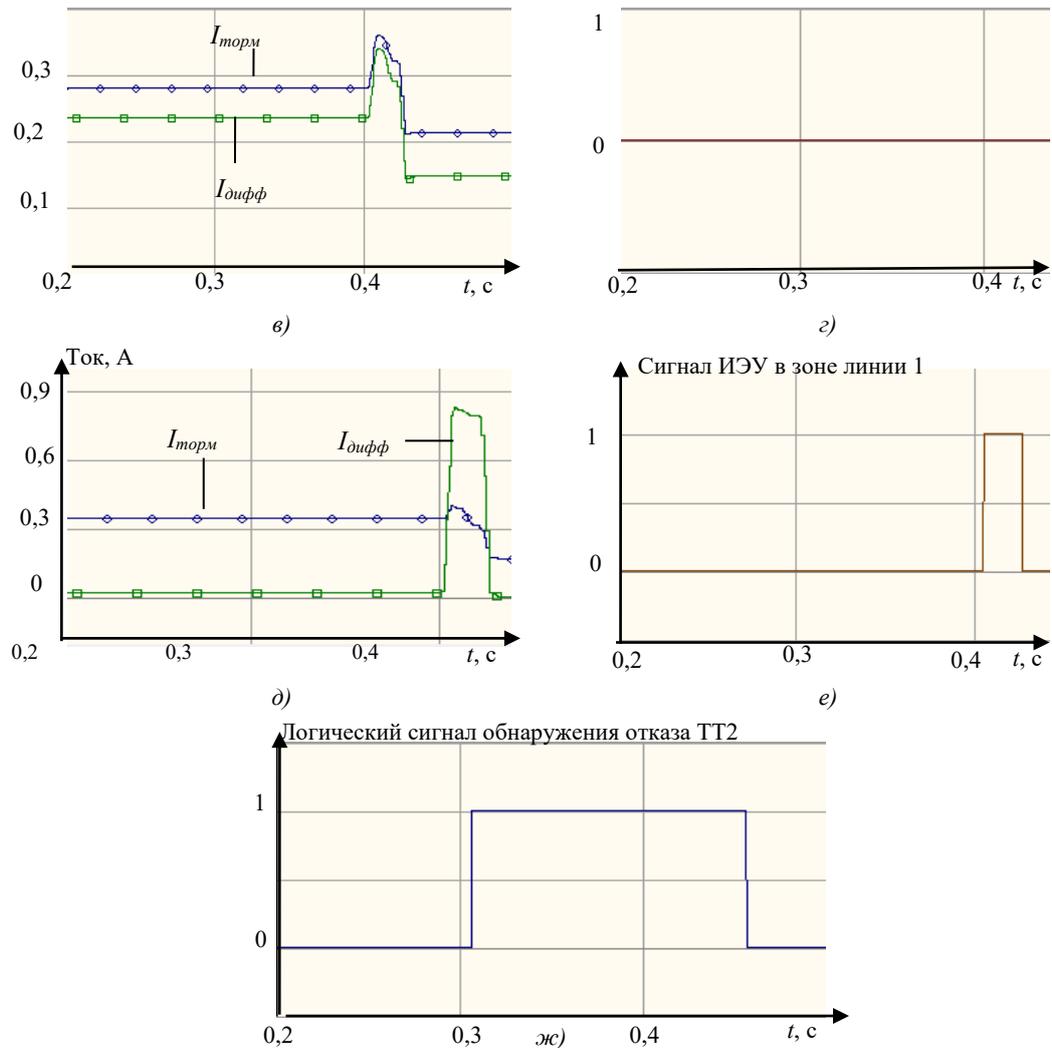


Рис.11 - Моделирование нормального режима электросети с последующим возникновением отказа ТТ2 и возникновении КЗ в зоне линии 1 момент времени 0,4 секунды в фазе А при работе алгоритма обнаружения отказа ТТ: а) осциллограмма первичных токов ТТ2, б) осциллограмма вторичных токов ТТ2, в) осциллограмма  $I_{\text{торм}}$  и  $I_{\text{дифф}}$  в объединенной зоне, г) действие ИЭУ в объединенной зоне (ожидание), д) осциллограмма  $I_{\text{торм}}$  и  $I_{\text{дифф}}$  в зоне линии 1, е) действие ИЭУ в зоне линии 1 на отключение, ж) осциллограмма логического сигнала обнаружения отказа ТТ2

\*Источник: составле но автором. \*Source: compiled by the author

Для сжатия информации дифференциальных защит, передаваемой между смежными комплектами по информационной сети, возможно использование синхровекторов [14]. Недостатком такого решения может являться некоторое замедление защиты из-за необходимости расчета векторов.

Достоинства предложенного алгоритма:

- отказы ТТ обнаруживаются однозначно и независимо от того какой режим существует в электросети: КЗ, нормальный режим или любой другой режим;
- отказы ТТ обнаруживаются мгновенно сразу после из возникновения. Поэтому становится очень мала вероятность возникновения события одновременного отказа разных ТТ и неправильного действия РЗ вследствие этого;
- за счет дополнительной логики имеется возможность адаптировать, подготовить систему РЗА к возникновению следующего отказа ТТ, а также к любым аварийным

режимам для мгновенного отключения. Вывод отказавшей РЗ из работы уже не является единственным доступным вариантом;

- возникающие отказы ТТ обнаруживаются за счет уже имеющихся сигналов защит, поэтому нагрузка на информационную сеть минимизируется;

- для обнаружения отказов ТТ не требуются дополнительные аппаратные средства, обнаружение производится логической надстройкой над смежными дифференциальными РЗ.

#### **Заключение (Conclusions)**

В статье проведен краткий анализ проблемы надежности работы системы релейной защиты при отказах элементов самой защиты. Цифровизация устройств РЗА и внедрение систем информационного обмена в электросетях потенциально позволяет автоматически обнаруживать отказы элементов системы РЗА, отделять их от текущих режимов электросети. Автоматическое обнаружение отказов РЗА позволит реализовать оптимальные мероприятия, например, адаптацию системы РЗА, что повысит ее надежность.

В статье рассмотрен алгоритм автоматического обнаружения отказов ТТ и токовых цепей РЗА, основанный на первом з-не Кирхгофа и использующий межподстанционную информационную сеть. Предложенный алгоритм позволяет не только однозначно обнаружить эти отказы, но и произвести мгновенную адаптацию зон дифференциальной РЗ при необходимости сохранения быстродействия РЗ.

Создана имитационная модель электросети и проведены эксперименты по различным ситуациям отказов в электросети и цепях трансформаторов тока: возникновение короткого замыкания в зоне защиты, внешнего короткого замыкания. Моделирование подтвердило правильную работу предложенного алгоритма: система РЗ автоматически обнаруживает отказ в своих цепях ТТ и блокируется или адаптируется к нему, правильно срабатывая при последующем КЗ.

#### **Литература**

1. Федосеев А.М. Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1992, 528 с.
2. Гвоздев Д.Б., Грибков М.А., Романов Ю.В., Рыбаков А.К. Применение современных технологий при эксплуатации РЗА для повышения надежности их функционирования // Электроэнергия. Передача и распределение № 1(64), 2021, с. 120-123
3. Новобрицкий В.А., Федосов Д.С. Анализ работы устройств релейной защиты в переходном режиме, сопровождающемся насыщением трансформатора тока// Проблемы энергетики № 5 (23) , 2021, с. 71-85
4. Dragan Ristanovic, Terry Tadlock, Gautami Bhatt, Current Transformers in Protection Applications: The ANSI and International Electrotechnical Commission Standards, Industry Applications journal IEEE. 2021. V. 27. no. 5. pp. 47-57.
5. Khalyasmaa A.I., Senyuk M.D., & Eroshenko S.A. (2021). Analysis of the State of High-Voltage Current Transformers Based on Gradient Boosting on Decision Trees. IEEE Transactions on Power Delivery.36(4). pp.2154-2163D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk. Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels, Advanced Trends in Radioelectronics Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) 2020 IEEE 15th International Conference on. 2020. pp. 185-189.
6. Song, M.-H.; Kang, S.-H.; Lee, N.-H.; Nam, S.-R. IEC 61850-Based Centralized Busbar Differential Protection with Data Desynchronization Compensation. Energies 2020, 13, 967.
7. Шалин А. И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем /А. И. Шалин. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 384 с.
8. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Дифференциально-логический принцип релейной защиты сетей электроснабжения // Электрические станции, 2018. № 3. с. 37–46.
9. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007, 549 с.
10. Подшивалин А.Н., Подшивалина И.С. Основы Методологии Расчета Уставов Микропроцессорной Релейной Защиты // Известия Высших Учебных Заведений. Электромеханика.2010 . № 3 С. 69-74.
11. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А., и др. Дифференциальная защита шин 110-220 кВ с применением метода двойной записи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19(11-12). С. 21-31.
12. СТО 56947007-29.240.10.303-2020 Методические указания по реализации мониторинга работоспособности измерительной части терминалов РЗА, АСУ ТП и других средств измерений вторичных цепей средствами АСУ ТП на объектах ПАО «ФСК ЕЭС»6- Надежность систем энергетики и их оборудования : справочник в 4-х т. / Под общ.ред. Ю.Н. Руденко. Т.2. Надежность

электроэнергетических систем : справочник / под ред. М.Н. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.

13. Шарыгин М.В., Джериу Ахмед Сахиб Наджи, Обалин М.Д. Реализация логической схемы дифференциальной защиты сборных шин с использованием информационной сети // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 2 (62). С. 106-118.

14. Мокеев А.В., Пискунов С.А., Ульянов Д.Н., Хромцов Е.И. Повышение эффективности и надежности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС // Вестник Казанского государственного энергетического университета. КГЭУ. 2020. с. 92-100.

15. Song, M.-H.; Kang, S.-H.; Lee, N.-H.; Nam, S.-R. IEC 61850-Based Centralized Busbar Differential Protection with Data Desynchronization Compensation. *Energies* 2020, 13, 967.

16. Ли, У.; Тан, Ю.; Ли, Ю.; Цао, Ю.; Чен, С.; Чжан, М. A new strategy for differential backup protection of intelligent distribution networks: a fast and reliable approach. *IEEE Access* 2019, 7, 38135-38145.

#### Авторы публикации

**Шарыгин Михаил Валерьевич** – д.т.н., профессор кафедры "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника", Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. E-mail: [sharygin.m.v@gmail.com](mailto:sharygin.m.v@gmail.com).

**Джериу Ахмед Сахиб Наджи** – соискатель, кафедры "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника", Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. E-mail: [ahmed\\_6891@yahoo.com](mailto:ahmed_6891@yahoo.com).

**Альшахери Аммар Муса Абдулхасан** – соискатель, кафедры "Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника", Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. E-mail: [amar.alshmary@yahoo.com](mailto:amar.alshmary@yahoo.com).

#### References

1. Fedoseev A.M. Fedoseev M.A. Relay protection of electric power systems: Studies for universities. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1992, 528 p.

2. Gvozdev D.B., Gribkov M.A., Romanov Yu.V., Rybakov A.K. The use of modern technologies in the operation of remote control systems to increase the reliability of their functioning // *Electricity. Transmission and Distribution* No. 1(64), 2021, pp. 120-123.

3. Novobritskiy V.A., Fedotov D.S. Analysis of the operation of relay protection devices in a transient mode accompanied by saturation of a current transformer// *Problems of energy* No. 5 (23), 2021, pp. 71-85

4. Dragan Ristanovic, Terry Tadlock, Gautami Bhatt, Current Transformers in Protection Applications: The ANSI and International Electrotechnical Commission Standards, *Industry Applications journal IEEE*. 2021. V. 27. no. 5. pp. 47-57.

5. Khalyasmaa A.I., Senyuk M.D., & Eroshenko S.A. (2021). Analysis of the State of High-Voltage Current Transformers Based on Gradient Boosting on Decision Trees. *IEEE Transactions on Power Delivery*.36(4). pp.2154-2163D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk. Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels, *Advanced Trends in Radioelectronics Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) 2020 IEEE 15th International Conference on*. 2020. pp. 185-189.

6. Song, M.-H.; Kang, S.-H.; Lee, N.-H.; Nam, S.-R. IEC 61850-Based Centralized Busbar Differential Protection with Data Desynchronization Compensation. *Energies* 2020, 13, 967.

7. Shalin A. I. Reliability and diagnostics of relay protection of power systems /A. I. Shalin. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2003. 384 p.

8. Kulikov A.L., Sharygin M.V. Differential logic principle of relay protection of power supply networks // *Electric Stations*, 2018. No. 3. pp. 37-46.

9. Schneerson, E.M. Digital relay protection. Moscow: Energoatomizdat, 2007, 549 p.

10. Podshivalin A.N., Podshivalina I.S. Fundamentals Of Methodology For Calculating Microprocessor Relay Protection Settings // *News Of Higher Educational Institutions. Electromechanics*.2010 . No. 3, pp. 69-74.

11. Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A., and others. Differential protection of 110-220 kV buses using the double-entry method. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2017. Vol. 19(11-12). pp. 21-31.

12. SRT 56947007-29.240.10.303-2020 Methodological guidelines for monitoring the operability

of the measuring part of the terminals of the RPA, automated process control systems and other measuring instruments of secondary circuits using automated process control systems at the facilities of FGC UES PJSC6- Reliability of energy systems and their equipment : a handbook in 4 volumes / Under the general editorship of Yu.N. Rudenko. Vol. 2. Reliability of electric power systems : a handbook / edited by M.N. Rozanov. – M.: Energoatomizdat, 2000. – 568 p.

13. Sharygin M.V., Jeriu Ahmed Sahib Naji, Obalin M.D. Implementation of a logical scheme for differential busbar protection using an information network // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2024. Vol. 16. No. 2 (62). pp. 106-118.

14. Mokeev A.V., Piskunov S.A., Ulyanov D.N., Khramtsov E.I. Improving the efficiency and reliability of digital substations and digital distribution stations // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. KGEU. 2020. pp. 92-100.

15. Song, M.-H.; Kang, S.-H.; Lee, N.-H.; Nam, S.-R. IEC 61850-Based Centralized Busbar Differential Protection with Data Desynchronization Compensation. *Energies* 2020, 13, 967.

Li, Yu.; Tang, Yu.; Li, Yu.; CAo, Yu.; Chen, S.; Zhang, M. A new strategy for differential backup protection of intelligent distribution networks: a fast and reliable approach. *Access to IEEE* 2019, 7, 38135-38145.

### **Authors of the publication**

*Mikhail V. Sharygin* – Nizhny Novgorod State Technical University named R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod. E-mail: [sharygin.m.v@gmail.com](mailto:sharygin.m.v@gmail.com).

*Jeryo Ahmed Sahib Naji* – Nizhny Novgorod State Technical University named R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod. E-mail: [ahmed\\_6891@yahoo.com](mailto:ahmed_6891@yahoo.com).

**Alshaheri Ammar Mousa Abdulhasan** – Novgorod State Technical University named R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod. E-mail: [amar.alshmary@yahoo.com](mailto:amar.alshmary@yahoo.com).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

**Получено** **28.02.2025 г.**

**Отредактировано** **20.03.2025 г.**

**Принято** **24.04.2025 г.**



## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И.

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
lsahno2010@yandex.ru

**Резюме:** Рассмотрено решение задачи многокритериальной оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора с помощью алгоритма NSGA-II. В качестве критериев оптимизации приняты масса активных материалов, потери и отношение емкости между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки. Изложена методика расчета конструкции трансформатора, которая используется при оптимизации. Приведен пример оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора. Показано, что применение алгоритма NSGA-II позволило существенно сократить массу активных материалов и потери в трансформаторе по сравнению с базовым вариантом, рассчитанным по традиционной методике.

**Ключевые слова:** Высоковольтный испытательный трансформатор; методы многокритериальной оптимизации; NSGA-II; генетический алгоритм; электромагнитный расчет трансформатора.

**Для цитирования:** Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И. Оптимизация конструкции высоковольтного испытательного трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-69-81.

## OPTIMIZATION OF HIGH-VOLTAGE TEST TRANSFORMER DESIGN

Korovkin N.V., Sakhno L.I., Paramonov E.D., Sakhno O.I.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University , St. Petersburg, Russia  
lsahno2010@yandex.ru

**Abstract:** The paper considers the solution to the problem of multicriterial optimization of the high-voltage test transformer design using the NSGA-II algorithm. The optimization criteria are the mass of active materials, losses, and the ratio of the capacitance between the first and second layers of the secondary winding to the capacitance between the penultimate and last layers of the secondary winding. The calculation method for the transformer design used in the optimization is presented. An example of optimization of the high-voltage test transformer design is given. It is shown that the use of the NSGA-II algorithm made it possible to significantly reduce the mass of active materials and losses in the transformer compared to the basic version calculated using the traditional method.

**Keywords:** High voltage test transformer; leakage inductance; numerical methods; optimization methods; magnetostatic field; plane-parallel field.

**For citation:** Korovkin N.V., Sakhno L.I., Paramonov E.D., Sakhno O.I. Optimization of high-voltage test transformer design. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3):69-81. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-69-81.

### Введение (Introduction)

Трансформатор - один из наиболее востребованных видов электротехнического оборудования. Конструкция трансформатора существенно зависит от его типа, который характеризуется назначением, числом фаз, частотой, мощностью, классом напряжения,

числом обмоток, видом регулирования напряжения и видом охлаждения. Поиск оптимальной конструкции трансформатора является важнейшей задачей при проектировании трансформатора любого типа, поскольку обеспечивает его конкурентоспособность.

Главным критерием оптимальности конструкции трансформатора любого типа является его масса, определяемая в основном массой активных материалов - стали магнитопровода и меди обмоток и существенно влияет на его стоимость, так как расходы на активные материалы самые существенные при производстве трансформатора. Кроме минимизации массы активных материалов, при проектировании трансформатора необходимо обеспечить и другие технико-экономические характеристики, которые зависят от типа трансформатора. Например, для силовых трансформаторов необходимо обеспечить минимизацию стоимости трансформации электроэнергии в течение срока службы, для сварочных трансформаторов контактной сварки - минимальную индуктивность рассеяния, для измерительных трансформаторов тока - минимальный ток намагничивания в широких пределах изменения измеряемых токов. Необходимость обеспечения разнообразных технико-экономических характеристик делает задачу поиска оптимальной конструкции уникальной для каждого типа трансформатора, что в свою очередь требует от конструктора-разработчика большого опыта в области проектирования трансформатора именно этого типа.

Традиционно поиск оптимальной конструкции трансформатора любого типа состоит в электромагнитном, тепловом и механическом расчете 3-4 вариантов конструкции по известным методикам расчета, причем основные геометрические параметры и электромагнитные характеристики первого варианта выбираются близкими к соответствующим параметрам трансформатора-прототипа. Эти варианты отличаются основными размерами, массами активных материалов, стоимостью, параметрами холостого хода и короткого замыкания. Трудность поиска оптимального варианта традиционным способом определяется сложными зависимостями технико-экономических показателей трансформатора от его конструктивных параметров. Изменение одного конструктивного параметра, как правило, приводит к цепочке изменений других параметров, причем эти изменения могут оказывать противоположное влияние на технико-экономические показатели. Даже имея компьютерные программы, которые автоматизируют расчет трансформатора по имеющимся методикам, поиск оптимальной конструкции таким способом требует значительного времени, так как необходим анализ рассчитанных вариантов конструкций и выбор исходных данных для следующего варианта. Наиболее трудоемким процесс поиска оптимальной конструкции является в случае, когда конструкция нового трансформатора существенно отличается от прототипа. В этом случае расчет 3-4 и даже более вариантов может не дать оптимальной конструкции.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

Использование многоцелевой оптимизации в задачах электроэнергетики, к которым относится оптимизация высоковольтного испытательного трансформатора, - одна из важнейших современных тенденций ее развития. Так эти методы успешно используются для получения оптимальных конструкций турбо и гидрогенераторов [1,2], получения наилучших режимов работы энергосистем [3,4], сложных задачах формирования оптимальной перспективной структуры энергосистем [5].

В настоящее время для оптимизации конструкций трансформаторов разных типов используются методы многоцелевой оптимизации, в основе которых лежат модели биологических и физических процессов. В [6] исследуются новые эвристические методы (алгоритм оптимизации «Светлячок» (FA), алгоритм арифметической оптимизации (AOA), алгоритм оптимизации «Серый волк» (GWO) и алгоритм оптимизации «Искусственные отряды горилл» (GTO)), которые применены к оптимизации конструкции распределительного трансформатора мощностью 1000 кВА. Показано, что применение этих методов позволило снизить потери мощности на 3,5%, а массу трансформатора на 8,3%. В [7] успешно используется генетический алгоритм для нахождения оптимальной конструкции трансформатора повышенной частоты 10кГц, мощностью 20 кВт. К наиболее популярным методам многоцелевой оптимизации конструкций трансформаторов относится генетический алгоритм недоминантной сортировки второго поколения (далее NSGA-II). В [8] алгоритм NSGA-II применен к трансформатору с частотой 20 кГц и мощностью 3,52 кВт, в [9] к трехфазному промышленного трансформатору. При этом расчет электромагнитных параметров трансформаторов проводится с помощью МКЭ. В [10] даны результаты моделирования NSGA-II на ряде тестовых задач, где показана высокая производительность этого метода. В [11] дан улучшенный метод NSGA-II, который применен к тяговому трансформатору. Задачи, решенные в перечисленных работах, отличаются критериями оптимизации и переменными, однако, несмотря на эти отличия, все они показывают высокую эффективность метода NSGA-II. Большинство из них [6-9,10]

подтверждены результатами экспериментальных исследований, которые показывают улучшение параметров оптимизации в пределах 10%. В связи с этим в настоящей статье для оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора выбран метод NSGA-II, который позволит существенно сократить трудоемкость поиска оптимальной конструкции и расширить область изменения конструктивных параметров по сравнению с традиционным подходом.

Для успешного использования метода NSGA-II прежде всего необходимы надежные методы расчета основных электромагнитных параметров трансформатора, определяющих его конструкцию – индукцию магнитного поля в магнитопроводе, потери в обмотках и магнитопроводе, индуктивность рассеяния, пробивное напряжение. Методика расчета этих параметров разработана в тридцатых годах прошлого века и до сих пор широко используется для расчета силовых трансформаторов [12,13]. Эти методики основаны на допущениях о равномерном распределении магнитной индукции по магнитопроводу и спрямлении линий магнитного поля рассеяния. В тоже время интенсивно развиваются численные методы расчета магнитных полей, которые позволяют учесть неравномерность распределения магнитного поля по сечению магнитопровода и реальные свойства электротехнической стали при холостом ходе [14-16], а также влияние нагрузки трансформатора на магнитное поле в магнитопроводе [17,18]. Большая группа работ посвящена совершенствованию методов расчета индуктивностей рассеяния с использованием 3D-моделирования, например [20]. Подробный обзор аналитических и численных методов расчета индуктивностей рассеяния дан в [21], где показано, что аналитические методы расчета существенно отличаются для силовых, высокочастотных и планарных трансформаторов. Там же получена формула для расчета индуктивности рассеяния высоковольтного испытательного трансформатора, который рассматривается в настоящей статье.

На основе проведенного анализа выбраны методы расчета, которые используются в методике многокритериальной оптимизации высоковольтного испытательного трансформатора.

Целью статьи является разработка и апробация методики многокритериальной оптимизации высоковольтного испытательного трансформатора при стандартном техническом задании на проект [12] трансформатора с использованием алгоритма NSGA-II и оценка качества полученных с помощью этой методики конструкций трансформатора.

Практическая ценность работы состоит в экономии активных материалов трансформатора, уменьшении потерь в нем, сокращении времени проектирования и снижении требований к опыту конструктора.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

**Методика оптимизации.** Многокритериальная оптимизация предполагает выбор несколько конфликтующих между собой критериев оптимальности (целевых функций)  $F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots$ . Каждый критерий определяется конструктивными переменными, которые составляют вектор переменных  $\mathbf{X}$ . Поиск оптимального решения необходимо выполнять при определенных ограничениях на максимальные и минимальные значения конструктивных переменных:  $\forall_{k=1, N} : x_k \in \mathbf{X}; \underline{x}_k \leq x_k \leq \overline{x}_k$ , а также при возможных ограничениях на электромагнитные характеристики трансформатора. Математическая формулировка задачи с использованием введенных переменных для двух целевых функций имеет вид:

$$\begin{aligned} F_1(\mathbf{x}) &\xrightarrow{\mathbf{x}} \min, \\ F_2(\mathbf{x}) &\xrightarrow{\mathbf{x}} \min, \\ \underline{\mathbf{x}} &\leq \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{x}}, \\ G_n(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad n = \overline{1, M}. \end{aligned}$$

В основе генетического алгоритма лежит формирование нескольких поколений популяций. Популяция состоит из особей, представляющих собой конструкции трансформатора. Каждая особь обладает набором геометрических изменяемых параметров (набор генов). В каждом поколении происходит мутация генов отдельных особей и их размножение, в результате чего формируются следующие поколения. Для расчета каждой конструкции (особи) используется как традиционная методика расчета трансформатора, так и численные методы расчета магнитостатического и электростатического полей. Для того, чтобы исключить тепловой расчет трансформатора из прототипа задаемся амплитудой рабочей индукции  $B_m$ , плотностью тока в первичной обмотке  $J_1$  и плотностью тока вторичной

обмотки  $J_2$ . Количество особей в популяции и количество поколений задаются перед началом оптимизации.

Для оптимизации выбраны три критерия: масса активных материалов, потери, отношение емкости  $c_1$  между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости  $C_{m2}$  между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки. Этот критерий необходим для выравнивания напряжения между отдельными частями обмотки при срезах напряжения.

Изменяемые конструктивные параметры, составляющие вектор  $x$ : количества витков и слоев первичной обмотки, количество слоев вторичной обмотки, угол  $\alpha$  сечения вторичной обмотки (рис. 1). Ограничения на изменяемые параметры:

$$60 < w_1 < 160; \quad \frac{C_{m2}}{c_1} < 1,2; \quad 15^\circ < \alpha < 25^\circ. \quad (1)$$

Функциональное ограничение - отсутствие резонанса в трансформаторе:

$$\frac{1}{\omega^2 L_{12} c_H} - 1 < 0,01, \quad (2)$$

где  $L_{12}$  - индуктивность рассеяния, приведенная к вторичной обмотке,  $c_H$  - емкость нагрузки.  $\omega = 2\pi f$ .

Межслоевая изоляция и расстояние от последнего слоя высоковольтной обмотки до магнитопровода принимаются равными соответствующим параметром прототипа и задаются в процедуре оптимизации как постоянные величины. Также из прототипа задается расстояние от стержня магнитопровода до каркаса, на который наматываются обмотки.

Результатом решения сформулированной многокритериальной задачи оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора является множество Парето, включающее в себя все конструктивные параметры, при которых значение каждого критерия не может быть уменьшено без увеличения других критериев.

**Объект исследования.** Высоковольтный испытательный трансформатор, оптимизация конструкции которого рассматривается в данной статье, входит в состав передвижной установки, поэтому для него особенно актуальна минимизация массы и габаритов. Этот трансформатор предназначен для испытания кратковременным повышенным напряжением промышленной частоты электротехнического оборудования (трансформаторы тока и напряжения, силовые трансформаторы, разъединители и другие). Он помещен в корпус, заполненный элегазом. В статье рассматривается трансформатор со стержневым витым магнитопроводом и цилиндрическими многослойными обмотками. Первичная обмотка может иметь несколько последовательно соединенных секций для регулирования вторичного напряжения. Осевое сечение вторичной обмотки имеет трапециевидальную форму, которая позволяет обеспечить приблизительное равенство емкостей между слоями вторичной обмотки (рис.1).

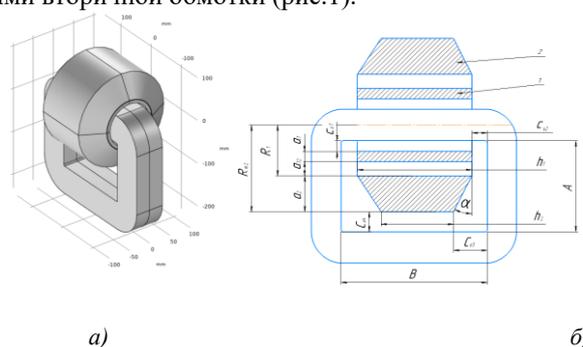


Рис.1. Конструкция высоковольтного испытательного трансформатора. а) общий вид, б) осевое сечение

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Между обмотками высшего и низшего напряжения располагают разрезной проводящий металлический экран, соединенный с сердечником, чтобы импульсы напряжения с обмотки высокого напряжения не передавались в обмотку низкого напряжения. Также, как и в силовых высоковольтных трансформаторах, в проектируемом трансформаторе необходимо обеспечить отсутствие перегрева обмоток и их изоляции, а также напряженность электростатического поля вблизи высоковольтных частей должна быть меньше пробивной напряженности изоляции. Электродинамические силы при коротких замыканиях на стороне высокого напряжения из-за малых токов не вызывают

опасности механических повреждений обмоток и не рассчитываются. Среди специфических требований, предъявляемых к высоковольтным испытательным трансформаторам, следует отметить синусоидальность формы вторичного напряжения, определяемую международными нормами и стандартами, и отсутствие резонанса в контуре высокого напряжения, состоящем из индуктивности рассеяния трансформатора, емкости трансформатора и емкости объекта испытаний. Перечисленные особенности должны быть учтены при оптимизации конструкции трансформатора.

**Постановка задачи.** Основные электромагнитные параметры проектируемого высоковольтного испытательного трансформатора (задание на проект) даны в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Электромагнитные параметры проектируемого трансформатора и прототипа  
*Electromagnetic parameters of the designed transformer and prototype*

Наименование параметра	Значение параметра проектируемого трансформатора	Значение параметра прототипа
Первичное напряжение $U_1$ , В	220	220
Вторичное напряжение $U_2$ , кВ	50/100	100
Частота, Гц	50	50
Установившийся ток КЗ, А, не менее	1,4	1,4
Напряжение КЗ, не более %	5	5
Максимальная емкость объекта испытаний, нФ	15	15
Испытательная мощность, кВА: - длительный режим	2,6	4,1
- повторно-кратковременный режим	5	7,8
Мощность нагрузки, кВА	5	-
Габаритные размеры, мм	-	350x350x620
Масса, кг	-	42

В качестве прототипа выбран трансформатор ИОГ-100/7,5, выпускаемый ОАО «Владимирский завод «Электроприбор». В этом трансформаторе используется стержневая конструкция трансформатора. На каждом стержне магнитопровода расположены половина первичной и половина вторичной обмотки [21]. Основные электромагнитные характеристики этого трансформатора, приведены в таблице 1.

Информация о массе активных материалов этого трансформатора в литературе отсутствует. Для сокращения времени поиска оптимальной конструкции сделано предположение, что тепловой режим проектируемого трансформатора не будет отличаться от теплового режима прототипа, если плотности тока в обмотках и рабочую индукцию в сечении магнитопровода проектируемого трансформатора принять равными соответствующим параметрам прототипа. Несмотря на разницу в конструкциях проектируемого трансформатора и прототипа, такое предположение можно считать обоснованным, поскольку мощность прототипа в 1,5 раза больше проектируемого трансформатора. Межслоевая изоляция и расстояние от высоковольтного вывода вторичной обмотки до магнитопровода выбираются равными соответствующим параметрам трансформатора - прототипа. После получения оптимальной конструкции следует провести теоретическую и экспериментальную проверку теплового режима проектируемого трансформатора.

#### Методика расчета конструкции трансформатора и критериев оптимизации

Покажем, что если задаться рабочей индукцией и плотностями токов в обмотках, а также размерами изоляционных промежутков, то геометрия трансформатора будет полностью определяться количествами витков  $W_1$  и слоев  $m_1$  первичной обмотки, количеством слоев вторичной обмотки  $m_2$  и углом  $\alpha$  сечения вторичной обмотки (рис.1).

Количество витков первичной обмотки  $W_1$  определяет сечение стержня магнитопровода [12,13]:

$$s = \frac{U_1}{4,44 f W_1 B_m}, \quad (3)$$

где  $f$  - частота,  $B_m$  - амплитуда рабочей индукции.

Листовая сталь для намотки магнитопровода выбирается в соответствии с ГОСТ 21427.1.83.

Сечение проводов первичной  $S_1$  и вторичной  $S_2$  обмоток определяется по формулам:

$$S_1 = \frac{I_1}{J_1}, \quad S_2 = \frac{I_2}{J_2}, \quad (4)$$

где  $I_1, I_2$  - номинальные токи первичной и вторичной обмоток,  $J_1, J_2$  - плотности тока в первичной и вторичной обмотках прототипа.

и выбираются согласно ГОСТ 31947-2012, ГОСТ 22301-77. Обозначения размеров проводов прямоугольного сечения первичной обмотки показаны на рисунке 2а, вторичной обмотки из проводов кругового сечения на рисунке 2б.

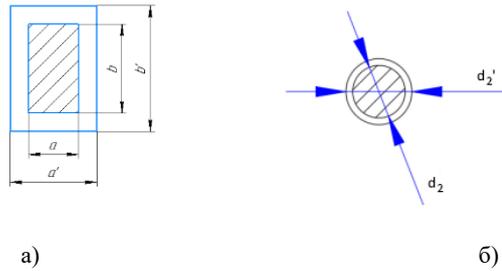


Рис.2. Поперечные сечения первичной (а) и вторичной (б) обмоток Fig. 2. Cross-sections of the primary (a) and secondary (b) windings

Высота первичной обмотки

$$h_1 = b' \cdot n_1, \quad (5)$$

где  $n_1 = \frac{W_1}{m_1}$  - количество витков в слое,  $m_1$  - количество слоев первичной обмотки.

Радиальный размер первичной обмотки:

$$a_1 = a' \cdot m_1 + c' \cdot (m_1 - 1). \quad (6)$$

$c'$  - толщина межслоевой изоляции первичной обмотки

Количество витков вторичной обмотки  $w_2 = \frac{W_1}{k}$ , где  $k = \frac{U_1}{U_2}$  - коэффициент трансформации. Радиальный размер вторичной обмотки:

$$a_2 = d_2' \cdot m_2 + c'' \cdot (m_2 - 1), \quad (7)$$

$m_2$  - количество слоев вторичной обмотки,  $d_2'$  - диаметр провода,  $c''$  - толщина межслоевой изоляции вторичной обмотки.

Одно из оснований трапеции, которое представляет осевое сечение вторичной обмотки, равно высоте первичной обмотки, другое определяется формулой:

$$h_2 = h_1 - 2a_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (8)$$

После определения размеров обмоток определяются размеры окна магнитопровода, которые необходимы для изготовления оправки для намотки стальной ленты магнитопровода (рис. 1):

$$A = c_{H1} + a_1 + a_{12} + a_2 + c_{H4}, \quad (9)$$

$$B = h_1 + 2c_{H2}. \quad (10)$$

Таким образом, все геометрические параметры трансформатора определены. Далее определяются объемы, занятые медью  $V_M$  и сталью  $V_{CT}$ , и первый критерий оптимизации - массу:

$$m = m_M + m_{CT} = \rho_M V_M + \rho_{CT} V_{CT}, \quad (11)$$

где  $m_M$  - масса меди,  $m_{CT}$  - масса стали,  $\rho_M$  - плотность меди,  $\rho_{CT}$  - плотность стали.

Следующий критерий оптимизации - потери в обмотках. Они складываются из потерь в обмотках:

$$P_1 = I_1^2 r_1, \quad P_2 = I_2^2 r_2, \quad (12)$$

где  $r_1 = \frac{w_1 l_1}{\gamma S_1}$  - активное сопротивление первичной обмотки,  $l_1$  - длина провода первичной

обмотки,  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость провода,  $r_2 = \frac{w_2 l_2}{\gamma S_2}$  - активное

сопротивление вторичной обмотки,  $l_2$  - длина провода вторичной обмотки.

И потерь в магнитопроводе:

$$P_{\text{СТАЛЬ}} = p \cdot m_{\text{СТАЛЬ}}, \quad (13)$$

где  $p$  - удельные потери в стали, которые определяются по ГОСТ 21427.1-83,  $m_{\text{СТАЛЬ}}$  - масса стали.

Для расчета третьего критерия - отношение емкости  $C_1$  между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости  $C_{m_2}$  между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки получена формула:

$$\frac{C_{m_2}}{C_1} = \frac{h_2 \ln \frac{R_2}{R_1}}{h_1 \ln \frac{R_{m_2}}{R_{m_2-1}}}, \quad (14)$$

где  $R_1, R_2$  - радиусы первого и второго слоев,  $R_{m_2-1}, R_{m_2}$  - радиусы предпоследнего и последнего слоев (рис. 1).

Для проверки функционального ограничения (2) необходимо найти индуктивность рассеяния трансформатора [20]:

$$L_{12} = \mu_0 \pi D w_1^2 \left( a_{12} + \frac{a_1}{3} + \frac{4}{(h_1 + h_2)^2} \left( \frac{h_1^2 a_2}{3} + \frac{h_1 a_2^2 \text{tg} \alpha}{2} + \frac{a_2^3 \text{tg}^2 \alpha}{5} \right) \right) / l, \quad (15)$$

где  $D$  - средний диаметр обмоток.

После расчета конструкции трансформатора необходимо проверить распределение первичного тока между параллельно соединенными секциями и рабочую индукцию в магнитопроводе, которая может быть больше принятой из прототипа, так как у трансформатора емкостная нагрузка. Методика расчета подробно изложена в [17,18]. При превышении плотности тока по сравнению с первоначально выбранным находится новое сечение по (4), при превышении индукции также необходимо найти новое сечение по (3) и повторить весь расчет конструкции трансформатора. Блок-схема алгоритма NSGA-II оптимизации трансформатора показана на рисунке 3.

После нахождения множества Паретто выбираются ряд конструкций для изготовления, для которых выполняется 3D расчет магнитостатического и электростатического полей и уточнение индуктивности рассеяния, межслоевых емкостей и напряженности электрического поля вблизи высоковольтной части вторичной обмотки, на основе которых выбирается окончательный вариант.



Рис.3. Блок-схема генетического алгоритма \*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

### Результаты (Results)

Из таблица 1 для трансформатора-прототипа ИОГ-100/7,5 принимаем следующие основные электромагнитные характеристики проектируемого трансформатора: амплитуда рабочей индукции  $B_m = 1,24$  Тл, плотность длительного тока в первичной обмотке  $3,75$  А/мм<sup>2</sup>, плотность длительного тока вторичной обмотки  $1,6$  А/мм<sup>2</sup>. Принимая во внимание указанные параметры первичную обмотку выполняем из проводов прямоугольного сечения ПСД- 1,4x2,8 (ГОСТ 22301-77), вторичной – кругового диаметр ПТВ -2-0,14 (ГОСТ 31947-2012). Первичная обмотка наматывается на специальный каркас, выполненной в виде цилиндра. Расстояния от стержня магнитопровода до каркаса  $1$  мм, толщина каркаса  $3$  мм ( $c_{m1} = 4$  мм на рис.1), расстояние от последнего слоя высоковольтной обмотки до магнитопровода  $c_{m3} = 25$  мм. Межслоевая изоляция выполнена из ленты ЭЛИЗТЕРМ-155-ТПл (31913-2011).

Первоначально был рассчитан базовый вариант конструкции трансформатора по стандартной методике по данным таблицы 1 с учетом конструкции трансформатора-прототипа. В этой конструкции количество витков первичной обмотки  $148$ , вторичной -  $63000$ , количество слоев первичной обмотки  $3$ , вторичной  $98$ ,  $\alpha = 20^\circ$ . По результатам расчета получено: масса меди составляет  $7,3$  кг, масса стали  $22,5$  кг, суммарная масса активных материалов  $29,6$  кг.

При оптимизации конструкции с использованием алгоритма NSGA-II принято:

- число поколений  $100$ ,
- число особей (конструкций) в поколении  $5000$ ,
- точность расчета  $1 \cdot 10^{-6}$ ,
- разброс особей (рассеяние) изменялось от  $0,6$  до  $0,8$

Результаты оптимизации приведены на рис. 4, где в трехкритериальном пространстве приведены Парето-множества, полученные в результате оптимизации конструкции трансформатора. Точка, соответствующая базовому трансформатору, выделена на рисунке красным цветом. Парето-множество показывает, в частности, множество конструкций трансформатора, лучших базового по выбранным критериям.

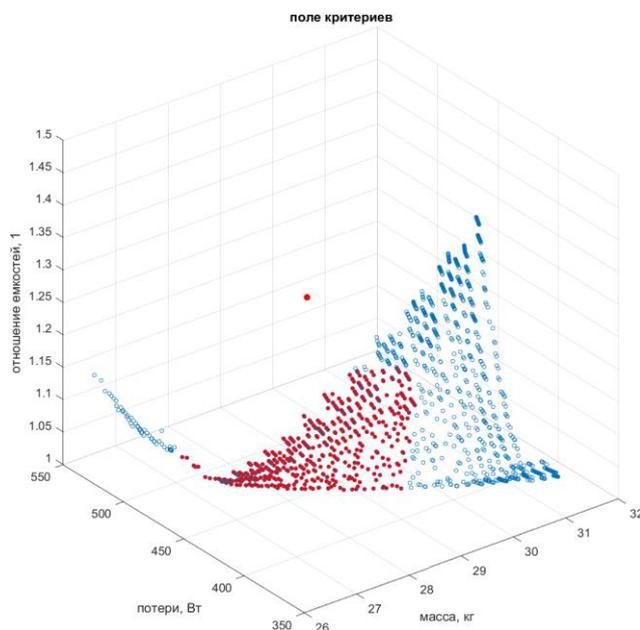


Рис.4. Множество Парето конструкций и точка, соответствующая базовому трансформатору  
 \*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

В таблице 3 приведены варьируемые параметры и функции цели для трех трансформаторов, которые превосходят базовый по массе. Второй и третий варианты превосходят базовый и по потерям. Критерий  $\frac{C_{m2}}{C_1} < 1,2$  согласно (1). В таблице 4 даны геометрические параметры этих трансформаторов, которые объясняют результаты, полученные в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Варьируемые параметры и функции цели рассчитанных конструкций трансформаторов  
Variable parameters and functions of the purpose of the calculated transformer designs

#	Варьируемые параметры				Функции цели		
	Число слоев первичной обмотки, $m_1$	Угол $\alpha^\circ$	Число витков первичной обмотки, $w_1$	Число слоев вторичной обмотки	Масса активных материалов, кг	Потери, Вт	Отношение емкостей $C_{m_2}/C_1$
1	4	17	132	110	26,33	510	1,17
2	5	15,6	149	142	26,79	480	1,17
3	5	17	160	144	26,73	460	1,17
Базовый вариант	3	30	148	90	29,8	490	1,04

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Геометрические параметры рассчитанных конструкций трансформаторов  
Geometric parameters of the calculated transformer designs

№ варианта	Высота $h_1$ первичной обмотки, мм	Ширина $a_1$ первичной обмотки, мм	Высота $h_2$ вторичной обмотки, мм	Ширина $a_2$ вторичной обмотки, мм
1	117,70	9,29	77,56	60,91
2	107,32	11,19	63,76	78,27
3	114,24	11,19	67,06	79,26
4	172	7,4	117	50

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Все трансформаторы в таблице 3 имеют массу трансформатора меньше, чем масса базового трансформатора. Уменьшение массы варианта 3 достигнуто за счет увеличения количества витков и слоев первичной обмотки. Увеличение количества витков приводит к уменьшению сечения магнитопровода, а увеличение слоев приводит к уменьшению высоты первичной обмотки (так как уменьшилось количество проводов в одном слое) и, соответственно, один из размеров окна уменьшился приблизительно на 50%. По сравнению с общей шириной окна радиальной размер первичной обмотки увеличился незначительно с 7,4 мм для базового до 11,2 мм в третьем варианте. В результате сократилась средняя длина магнитопровода, что также привело к уменьшению массы магнитопровода. Поэтому общая масса первого варианта по сравнению с базовым уменьшилась на 11,4%. На рис.5 показаны половины осевых сечений базового трансформатора и варианта 3 из таблицы 4. Эти половины разделены осевой линией. В практике проектирования основные геометрические размеры трансформатора принято характеризовать коэффициентом:

$$\beta = \frac{\pi D}{h}, \quad (17)$$

где  $D$  - средний диаметр обмоток,  $h$  - высота трансформатора.

Для базового трансформатора  $\beta = 0,93$ , для рассчитанного с использованием алгоритма NSGA-II  $\beta = 1,48$ . Эти коэффициенты отличаются почти на 60%. Таким образом, конструкция трансформатора, полученная с помощью предлагаемого подхода, существенно отличается от базового.

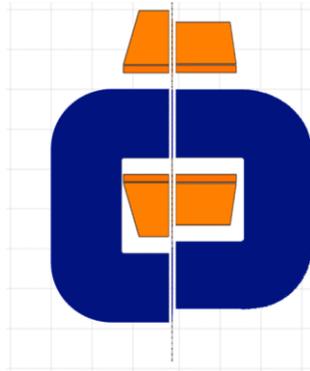


Рис.5. Сечение базовой (справа) и оптимальной (слева) конструкций *Fig.5. Section of the basic (right) and best (left) designs*

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

### **Заключение (Conclusions)**

1. Оптимизация конструкции высоковольтного испытательного трансформатора с использованием алгоритма NSGA-II позволила сократить массу трансформатора на 11%, при этом потери уменьшены на 4%, отношение емкостей  $C_{m_2}/C_1$  не превышает 1,2.

2. Разработанная методика может быть адаптирована для любого типа трансформатора при изменении критериев оптимальности на критерии, соответствующие этому типу трансформатора и внесении дополнений в методику его расчета.

3. Применение алгоритма NSGA-II существенно снижает требования к опыту конструктора, проектирующего трансформатор определенного типа, так как оптимальные размеры трансформатора получаются автоматически, а не в результате многократного расчета, анализа и изменения вариантов конструкций, обеспечивающих достижение критериев оптимальности.

### **Литература**

1. Коровкин Н.В., Марков М.А. Оптимизация параметров турбогенератора твв-360 по векторному критерию. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 4. С. 49-54.
2. Коровкин Н.В., Гулай С.Л., Верховцев Д.А. Оптимизация параметров гидрогенератора. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 4. С. 42-50
3. Ковбаса В.Д., Коровкин Н.В. Минимизация отклонений напряжений узлов и потерь в энергосистеме на основе многокритериальной оптимизации. Изв. НТЦ Единой энергетической системы. 2023. № 2 (89). С. 31-38.
4. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N.V. Multiobjective optimization of power flow distribution in eps with res under minimum number of transformer's on-load tap changing. Elektrichestvo. 2022. № 5. С. 10-20
5. Беляев Н.А., Гурьева А.Ю., Коровкин Н.В., Олейник Н.А. Формирование рациональной перспективной структуры ЕЭС России на основе мультикритериальной оптимизации. Изв. НТЦ Единой энергетической системы. 2024. № 1 (90). С. 5-19.
6. M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," in IEEE Access, vol. 11, pp. 15968-15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
7. O. Olowu, H. Jafari, M. Moghaddami and A. I. Sarwat, "Multiphysics and Multiobjective Design Optimization of High-Frequency Transformers for Solid-State Transformer Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 1, pp. 1014-1023, Jan.-Feb. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3035129.
8. K. Zhang, W. Chen, X. Cao, Z. Song, G. Qiao and L. Sun, "Optimization Design of High-Power High-Frequency Transformer Based on Multi-Objective Genetic Algorithm," 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, China, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAC.2018.8590371
9. S. Mohammed and R. A. Vural, "NSGA-II+FEM Based Loss Optimization of Three-Phase Transformer," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 9, pp. 7417-7425, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2881935.
10. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017

11. Ding, C. Yang and B. Xiong, "Multi-Objective Optimal Design of Traction Transformer Using Improved NSGA-II," 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1470-1474, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634516.
12. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Учебное пособие для вузов. М: Энергия. 1974, 544 с.
13. Г.Н. Петров. Электрические машины. Часть первая. Введение. Трансформаторы. М: Энергия. 1974, 240 с.
14. Калинин Е.В. Моделирование потерь в шихтованных сердечниках силовых трансформаторов//Интеллектуальная электротехника.-2020-№1(9).-С.52-68.
15. Wang K. et al. Fast Calculation Method of Magnetic field in Transformer Core Based on Magnetic Circuit Modeling //Annual Conference of China Electrotechnical Society. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – С. 604-616.
16. L. Lu, Y. Che, X. Wu, G. Li, Z. Yang and L. Zhu, "Magnetic Field Calculation of Distribution Transformer with Finite Element Method," 2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICESIT), Chongqing, China, 2021, pp. 585-588, doi: 10.1109/ICESIT53460.2021.9696770.
17. Sakhno L. I. et al. Transformer under load condition: comparison of FEA and equivalent circuit analysis //Тезисы доклада на XXV международном симпозиуме « Электромагнитные явления в нелинейных цепях » 2018. – Т. 26. – С. 18-28.
18. L. Sakhno O. Sakhno, E. Kharlamova Calculation and Measurement of the Magnetic Flux in the Magnetic Core of Welding Transformers International Journal of Applied Engineering Research (IAER), 2016, vol.11, No.22, pp. 11055-11059
19. P. Zhihua et al., "Three-dimensional Leakage Magnetic Field Simulation and Short-circuit Impedance Calculation of Large Yoke Transformer," 2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS), Chongqing, China, 2021, pp. 479-482, doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00105.
20. Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И., Кочеткова Е.Ю., Миневич Т.Г. Выбор аналитического метода расчета индуктивности рассеяния при оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(6):81-93. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-6-81-93>
21. Усачев А.Е. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения: получение высоких напряжений: учеб. пособие / А.Е. Усачев. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 103 с.

#### Авторы публикации

**Коровкин Николай Владимирович** – д-р техн. наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, [nikolay.korovkin@gmail.com](mailto:nikolay.korovkin@gmail.com).

**Сахно Людмила Ивановна** – д-р техн. наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, [lsahno2010@yandex.ru](mailto:lsahno2010@yandex.ru).

**Парамонов Евгений Дмитриевич** – инженер-конструктор ООО «Марс-энерго СК», г. Санкт-Петербург, Россия, [paramon.j.e.k@gmail.com](mailto:paramon.j.e.k@gmail.com).

**Сахно Ольга Ивановна** – канд.техн.наук, доцент кафедры «Высшая математика» Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, [olga.sakhnoj@yandex.ru](mailto:olga.sakhnoj@yandex.ru).

#### References

1. Korovkin N.V., Markov M.A. Optimizaciya parametrov turbogenerators tvv-360 po vektornomu kriteriyu. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2020. № 4. S. 49-54.
2. Korovkin N.V., Gulaj S.L., Verhovcev D.A. Optimizaciya parametrov gidrogenerators. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2019. № 4. S. 42-50
3. Kovbasa V.D., Korovkin N.V. Minimizaciya otklonenij napryazhenij uzlov i poter' v energosisteme na osnove mnogokriterial'noj optimizacii. *Izv. NTC Edinoj energeticheskoj sistemy*. 2023. № 2 (89). S. 31-38.

4. Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N.V. Multiobjective optimization of power flow distribution in eps with res under minimum number of transformer's on-load tap changing. *Elektrichestvo*. 2022. № 5. С. 10-20
5. Belyaev N.A., Gur'eva A.Yu., Korovkin N.V., Olejnik N.A. Formirovanie racional'noj perspektivnoj struktury EES Rossii na osnove mul'tikriterial'noj optimizacii. *Izv. NTC Edinoj energeticheskoy sistemy*. 2024. № 1 (90). S. 5-19.]
6. M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15968-15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
7. O. Olowu, H. Jafari, M. Moghaddami and A. I. Sarwat, "Multiphysics and Multiobjective Design Optimization of High-Frequency Transformers for Solid-State Transformer Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 1, pp. 1014-1023, Jan.-Feb. 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3035129.
8. K. Zhang, W. Chen, X. Cao, Z. Song, G. Qiao and L. Sun, "Optimization Design of High-Power High-Frequency Transformer Based on Multi-Objective Genetic Algorithm," *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, Shenzhen, China, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEAC.2018.8590371
9. S. Mohammed and R. A. Vural, "NSGA-II+FEM Based Loss Optimization of Three-Phase Transformer," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 7417-7425, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2881935.
10. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017
11. Ding, C. Yang and B. Xiong, "Multi-Objective Optimal Design of Traction Transformer Using Improved NSGA-II," *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Gyeongju, Korea, Republic of, 2021, pp. 1470-1474, doi: 10.23919/ICEMS52562.2021.9634516.
12. Tihomirov P. M. Raschet transformatorov. Uchebnoe posobie dlya vuzov. M: Energiya. 1974, 544 s.
13. G.N. Petrov. Elektricheskie mashiny. Chast' pervaya. Vvedenie. Transformatory. M: Energiya. 1974, 240 s.
14. Kalinin E.V. Modelirovanie poter' v shihtovannyh serdechnikah silovyh transformatorov//*Intellektual'naya elektrotehnika.-2020-№1(9).-S.52-68.*
15. Wang K. et al. Fast Calculation Method of Magnetic field in Transformer Core Based on Magnetic Circuit Modeling //*Annual Conference of China Electrotechnical Society. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – C. 604-616.*
16. L. Lu, Y. Che, X. Wu, G. Li, Z. Yang and L. Zhu, "Magnetic Field Calculation of Distribution Transformer with Finite Element Method," *2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICESIT)*, Chongqing, China, 2021, pp. 585-588, doi: 10.1109/ICESIT53460.2021.9696770.
17. Sakhno L. I. et al. Transformer under load condition: comparison of FEA and equivalent circuit analysis //*Тезисы доклада на XXV международном симпозиуме « Электромагнитные явления в нелинейных цепях » 2018. – Т. 26. – С. 18-28.*
18. L. Sakhno O. Sakhno, E. Kharlamova Calculation and Measurement of the Magnetic Flux in the Magnetic Core of Welding Transformers *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 2016, vol.11, No.22, pp. 11055-11059
19. P. Zhihua et al., "Three-dimensional Leakage Magnetic Field Simulation and Short-circuit Impedance Calculation of Large Yoke Transformer," *2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)*, Chongqing, China, 2021, pp. 479-482, doi: 10.1109/ICICAS53977.2021.00105.
20. Sahn L.I., Paramonov E.D., Sahn O.I., Kochetkova E.Yu., Minevich T.G. Vybor analiticheskogo metoda rascheta induktivnosti rasseyaniya pri optimizacii konstrukcii vysokovol'nogo ispytatel'nogo transformatora. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2024;26(6):81-93. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-6-81-93>
21. Usachev A.E. *Ispytatel'nye i elektrofizicheskie ustanovki vysokogo napryazheniya: poluchenie vysokih napryazhenij: ucheb. posobie / A.E. Usachev. – Kazan': Kazan. gos. energ. un-t, 2014. – 103 s.*

#### Authors of the publication

**Nikolay V. Korovkin** - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>, [nikolay.korovkin@gmail.com](mailto:nikolay.korovkin@gmail.com).

© Коровкин Н.В., Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И.

**Liudmila I. Sakhno** - Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia,  
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-7204-5449>, [lsahno2010@yandex.ru](mailto:lsahno2010@yandex.ru).

**Evgenii D. Paramonov**- design engineer, LLS “Mars-energo SK”, Russia, [paramon.j.e.k@gmail.com](mailto:paramon.j.e.k@gmail.com).

**Olga I. Sakhno**- Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia,  
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-8879-986x>, [olga.sakhnoj@yandex.ru](mailto:olga.sakhnoj@yandex.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

**Получено** **28.02.2025 г.**

**Отредактировано** **20.03.2025 г.**

**Принято** **24.04.2025 г.**



## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Тухватуллин Л.Т.<sup>1</sup>, Исаков Р.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева–КАИ, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
[tukhvatullinlt@stud.kai.ru](mailto:tukhvatullinlt@stud.kai.ru), [ruslanisakov@yandex.ru](mailto:ruslanisakov@yandex.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Развитие современной промышленности неразрывно связано с внедрением большого количества разнообразных электрических аппаратов и сложных электронных устройств. Данный процесс неизбежно сопровождается значительным ростом потребления электроэнергии. Следовательно, возникает необходимость в бесперебойной подаче электропитания на энергообъект. Серьезным препятствием в этом процессе являются провалы напряжения, приводящие к нарушениям работы предприятия и поломке оборудования. ЦЕЛЬ. Провести анализ проблемы обеспечения стабильности напряжения на промышленных предприятиях в контексте провалов напряжения. МЕТОДЫ. Проводится обзор существующих на сегодняшний день инженерных мероприятий по нейтрализации провалов напряжений. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, дано определение понятия провала напряжения, приведены главные характеристики этого явления, такие как глубина и длительность. Представлены данные об основных причинах и последствиях провалов напряжения на предприятиях. Произведен анализ существующих средств и способов по минимизации влияния провалов напряжения на технологический процесс. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Каждый способ по борьбе с провалами напряжения имеет свои достоинства и недостатки. Также следует принимать во внимание, что часть из них воздействует на глубину провала, тогда как другая часть на его длительность. Использование того или иного метода должно обосновываться исходя из требований и специфики конкретного электрооборудования, при этом данные мероприятия должны согласовываться с другими технологическими процессами на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** провалы напряжения; бесперебойное электроснабжение; стабильность напряжения

**Для цитирования:** Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г. Способы повышения стабильности напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 82-101. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101.

## WAYS TO IMPROVE VOLTAGE STABILITY IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Tukhvatullin L.T.<sup>1</sup>, Isakov R.G.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
[tukhvatullinlt@stud.kai.ru](mailto:tukhvatullinlt@stud.kai.ru), [ruslanisakov@yandex.ru](mailto:ruslanisakov@yandex.ru)

**Abstract:** The growth of modern industry directly connects to the introduction of a wide variety of electrical apparatus and complex electronic devices. This growth inevitably leads to a significant increase in electricity consumption. As a result, industrial facilities require an uninterrupted power supply. Voltage sags present a serious obstacle in this process, causing disruptions in operations and equipment failures, which can lead to costly downtimes and increased maintenance expenses. OBJECTIVE. This study aims to analyze the issue of ensuring voltage stability at industrial enterprises in the context of voltage sags. METHODS. The

*research includes an overview of existing engineering measures designed to neutralize voltage sags. These measures encompass both hardware solutions, such as UPS systems and voltage regulators, and software strategies that monitor and manage electrical loads. RESULTS. The article discusses the relevance of the topic, defines voltage sags, and outlines the main characteristics of this phenomenon, including depth and duration. The analysis presents data on the primary causes and effects of voltage sags at various enterprises. It evaluates available means and methods for minimizing the impact of voltage sags on technological processes, thereby enhancing operational efficiency. CONCLUSION. Each method for addressing voltage sags comes with its own advantages and disadvantages. Moreover, some methods influence the depth of the failure while others affect its duration. Users should justify the choice of method based on the specific requirements of each electrical system, ensuring compatibility with other technological processes during the design phase. By thoughtfully applying these strategies, businesses can enhance their operational resilience against voltage disturbances.*

**Keywords:** voltage sags; voltage dips; uninterrupted power supply; voltage stability

**For citation:** Tukhvatullin L.T., Isakov R.G. Ways to improve voltage stability in the power supply system of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3):82-101. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время основная особенность промышленного производства заключается в том, что установленное технологическое оборудование не может нормально функционировать, если не выполняется требование по бесперебойному электроснабжению [1]. Для предприятий в области нефте- и газодобыче, транспортировке нефти и газа, переработке нефти, химическом производстве, горно-обогатительных производствах, целлюлозно-бумажной промышленности и т.д. перерыв питания на несколько секунд ведет к нарушению непрерывного технологического процесса и последующей остановке производства. На данный момент в нормативной технической документации отсутствуют требования по величине и времени провала напряжения для различных промышленных производств, что приводит к невозможности предъявлять требования к быстродействию релейной защиты и автоматики системы внешнего и внутреннего электроснабжения.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013<sup>1</sup> и IEEE 1159-2009<sup>2</sup> провал напряжения определяется как снижение среднеквадратичного значения напряжения между 0,1 и 0,9 о.е. и продолжительностью от полупериода до 1 мин. На рис. 1 показано представление провала напряжения, которое характеризуется величиной и продолжительностью провала. Величина провала определяется как самое низкое среднеквадратичное напряжение трех фазных напряжений во время события провала, а его продолжительность — это время, когда напряжение ниже порогового значения 0,9 о.е. во всех трех фазах. Обычно просадки напряжения и кратковременные перебои происходили из-за неисправностей в энергосистеме [2].

Системы электроснабжения промышленных предприятий со сложным технологическим циклом (химическая, нефтедобывающая, нефтеперерабатывающая и т.д.) характеризуется разветвленной структурой, большой долей и мощностью двигательной нагрузки (насосы, компрессоры, вентиляторы и т.д.). При снижении и провалах напряжения в системе электроснабжения необходимо обеспечивать высокую надежность электродвигательной нагрузки в режимах их выбега, автоматическом повторном включении и автоматическом вводе резерва.

Причины и последствия от провалов напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий представлены на рис. 2 [3].

Основной причиной возникновения провалов напряжения в сетях внешнего электроснабжения промышленных предприятий являются однофазные КЗ, составляющие 65 % от общего числа, при этом трехфазные - 5%; двухфазные - 10%; двойных замыканий на землю - 20%. Для сети внутреннего электроснабжения промышленных предприятий 6–10 кВ основными причинами возникновения провалов напряжения являются:

- короткие замыкания в сети 6-10 кВ;

<sup>1</sup> ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

<sup>2</sup> IEEE 1159-2019 «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. Рекомендуемая практика мониторинга качества электрической энергии».

- пуск и самозапуск мощных электродвигателей.

Основным видом повреждения в сети 6-10 кВ являются однофазные замыкания на землю с последующим переходом в двухфазное КЗ или двойное замыкание на землю.

По данным мониторинга существующих систем электроснабжения промышленных предприятий общее число провалов напряжения составляет более 100 за год, при этом максимальная длительность провала напряжения составляет 0,1-3 секунд и глубиной провала  $(0,65 \pm 0,01) \cdot U_{ном}$  [4].

При развитии современной промышленности требуются всё более сложные механизмы и технологические процессы, а вместе с тем более крупные системы электроснабжения. Например, в литейных алюминиевых производствах для выплавки продукта используется множество емкостей в виде электролизных ванн, потребляющих большое количество электроэнергии [5]. Прерывание электроснабжения в таких предприятиях даже на короткий период времени может привести к браку продукции, поломке оборудования, серьёзным финансовым убыткам и даже гибели людей [5]. Поэтому повышение качества подаваемой электроэнергии является главным условием надежного функционирования промышленных предприятий [6].

Также согласно статистическим данным [7] основные причины нарушения работы технологического оборудования это:

- 49% провалы напряжения
- 27% механический износ оборудования
- 16% неблагоприятные внешние условия
- 8% программные сбои

Как видно из приведенных цифр, на долю провалов напряжения приходится почти половина всех рабочих неисправностей оборудования. На основе приведенной информации можно сделать вывод о том, что одной из основных проблем электроснабжения предприятий являются провалы напряжения, которые создают аварийные ситуации в системе. Поэтому на сегодняшний день поддержание стабильности напряжения в сетях электроснабжения актуально для многих ведущих отраслей промышленности.

Целью настоящей работы является теоретическое обобщение научной проблемы, связанной со стабильностью напряжения на промышленных предприятиях.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Провести литературный обзор современных способов повышения стабильности напряжения систем электроснабжения производств.
2. Проанализировать и сравнить их основные характеристики.
3. На основе полученной информации определить наиболее перспективный подход к решению проблемы стабилизации напряжения.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

Провал напряжения определяется как временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения [8]. Обычно они имеют прямоугольную форму и характеризуются магнитудой и длительностью. На рисунке 1 изображен пример формы провала напряжения [9].

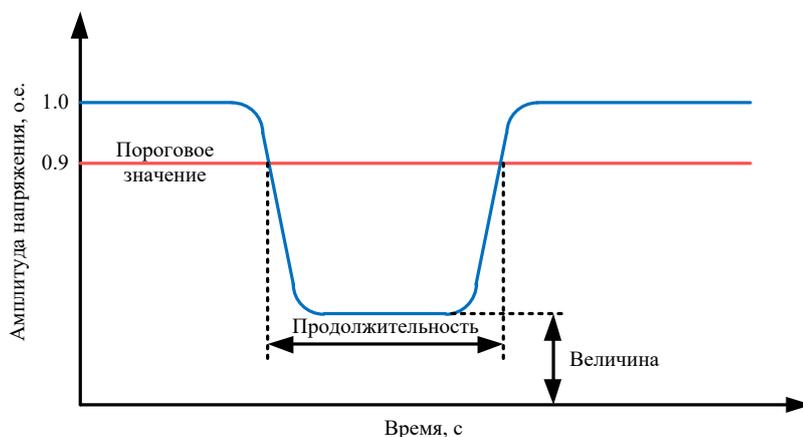


Рис. 1. Пример типичного провала напряжения *Fig. 1. An example of a typical voltage dip*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Основными характеристиками указанной помехи являются [10]:

- 1) Понижение напряжения электроэнергии ниже значения  $0,9 U_{ном}$ , где

$U_{\text{ном}}$  – номинальное значение напряжения. Провал характеризуется как нарушение в случае провала напряжения более 10% от номинального [9].

2) Время, измеренное в момент провала среднеквадратичного напряжения ниже порогового значения (90% номинального) до момента, когда оно поднимается выше него называется длительностью провала. Оно варьируется от десяти миллисекунд до 1 минуты [9].

Согласно [11] основными причинами провалов напряжения в электрических сетях могут быть:

1. Электрические неисправности. Короткие замыкания, замыкания между фазами и замыкания между фазой и землей в системе распределения электроэнергии являются основными причинами провалов напряжения. Они возникают в сетях внешнего электроснабжения промышленного предприятия (ЭПП) напряжением 35-500 кВ и в сетях внутреннего ЭПП напряжением 6-10 кВ. В сетях внешнего ЭПП провалы бывают двух видов:

- провал напряжения величиной до  $0,8U_{\text{ном}}$  и длительностью в половину периода напряжения  $t=0,01$  с. Такой провал приводит сбоям в программах управления частотно-регулируемым приводом (ЧРП), устройства плавного пуска (УПП). В результате чего происходит нарушение технологического процесса (ущерб в виде брака, недоотпуска продукции, порчи технологического оборудования, воздействия на окружающую среду в виде выбросов, возникновение пожаров и взрывов). Также при таком типе провала напряжения случается отпадание контактов, пускателей, низковольтных ЭД вспомогательных механизмов, что приводит к остановке электродвигателей напряжением 6(10) кВ;

- провал напряжения величиной до  $(0,1-0,5)U_{\text{ном}}$  и длительностью  $T=0,1\div 4$  с (обусловлено временем действия РЗА). Этот провал приводит к выпадению из синхронизма синхронного двигателя (СД).

2. Несанкционированные отключения. Ошибочные действия персонала, отключение от технологических защит, отключение от устройств противоаварийной автоматики. Такого рода провалы характеризуются отсутствием питающего напряжения и их длительность ( $T=0,1\div 4$  с) обусловлена временем действия защитной автоматики. Они могут вызвать выпадение из синхронизма СД, опрокидывание асинхронного двигателя (АД), а также привести к «лавине напряжения». Это в свою очередь приводит к снижению технологических параметров (давление, напор и т.д.) и отключению электрооборудования под действием технологических защит.

3. Коммутации в сети. В таких случаях величина провала напряжения доходит до  $0,8U_{\text{ном}}$ , а длительность  $T$  до 30 с, что обусловлено пуском мощных двигателей. Последствия данных провалов те же, что и у провалов, вызванных несанкционированными отключениями.

Последствия провалов напряжения в промышленных условиях могут быть серьезными: от незначительных перерывов в работе до значительных повреждений оборудования и производственных потерь. Основными последствиями являются:

1. Сбои в работе и простои. Автоматизированные производственные линии, станки с ЧПУ, робототехника и другое промышленное оборудование зависят от стабильного напряжения для корректной работы. Провалы напряжения могут привести к сбоям в работе этих систем, их сбросу или полной остановке. Даже кратковременное нарушение может остановить производственные процессы, что приведет к простоям и значительным потерям, особенно в отраслях с высокоскоростными непрерывными операциями, таких как автомобилестроение или химическая переработка.

2. Неисправности оборудования. Провалы напряжения могут вызвать сбои в работе чувствительной электроники, такой как программируемые логические контроллеры (ПЛК), частотно-регулируемые приводы (ЧРП) и системы управления. Это может привести к неправильному функционированию промышленных машин, неправильной регистрации данных и отказу систем безопасности. В критически важных отраслях, таких как фармацевтическое производство или переработка пищевых продуктов, даже незначительные неисправности могут иметь серьезные последствия.

3. Снижение эффективности двигателя и остановка. Электродвигатели широко используются в промышленных приложениях, от конвейеров и насосов до систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Провалы напряжения снижают крутящий момент, создаваемый двигателями, что приводит к снижению производительности [12]. В некоторых случаях двигатели могут останавливаться, что приводит к перегреву или повреждению. Повторные остановки могут привести к износу

двигателя, сокращению срока службы оборудования и увеличению расходов на техническое обслуживание.

4. Частое срабатывание защитных устройств. Автоматические выключатели, реле и предохранители могут срабатывать в ответ на провалы напряжения, ошибочно принимая провал за перегрузку или неисправность. Это может привести к ненужным отключениям машин и оборудования завода, еще больше нарушая работу. В отраслях со сложным оборудованием перезапуск систем может занять значительное время и усилия, что приводит к задержкам производства.

5. Проблемы контроля качества. Провалы напряжения могут повлиять на точное оборудование, такое как сварочные аппараты, станки с ЧПУ и робототехнику. Этим машинам требуются постоянные уровни напряжения для поддержания качества продукции. Изменения мощности могут привести к дефектам, некачественной отделке или незавершенным производственным циклам, что приводит к дорогостоящей доработке или бракованным материалам.

6. Потеря данных и сбой связи. Во многих отраслях промышленности операции контролируются и управляются компьютерными системами, которые собирают и обрабатывают данные в режиме реального времени. Провал напряжения может привести к отключению или перезапуску этих систем, что приведет к потере данных или неверной информации о процессе. В отраслях, которые полагаются на исторические данные для контроля качества и оптимизации процессов, такие сбои могут вызвать значительные эксплуатационные проблемы.

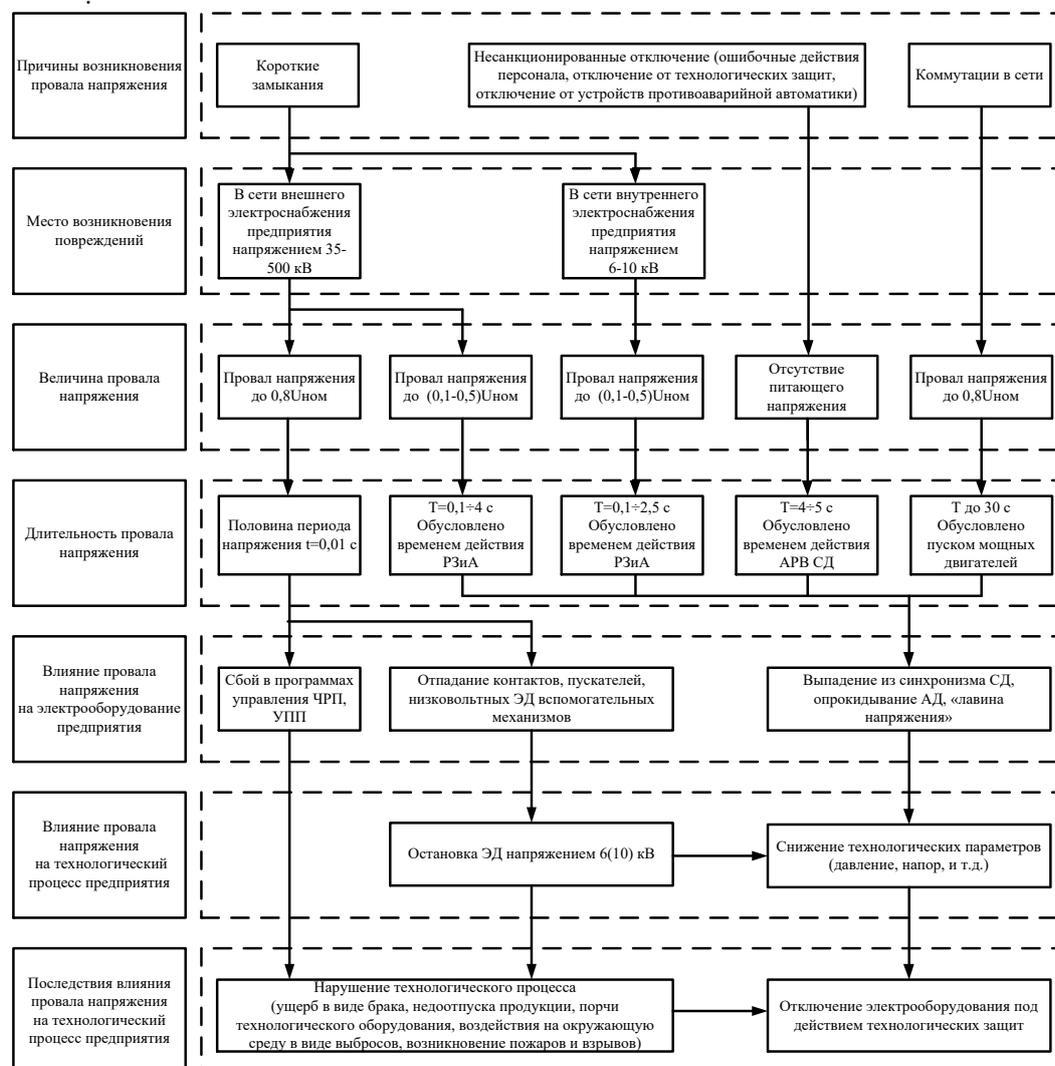


Рис. 2. Причины и последствия от провалов напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Также провалы напряжения могут привести к серьезным экономическим

последствиям для промышленного предприятия. К ним относятся:

1. Прямые затраты. Они включают в себя немедленные финансовые потери из-за остановок производства, отказов оборудования и проблем с качеством продукции. Например, в таких отраслях, как производство полупроводников, где точность является ключевым фактором, даже кратковременный провал напряжения может испортить целую партию, что обойдется в сотни миллионов рублей. Аналогично, в отраслях с высокоскоростными производственными линиями, таких как автомобилестроение, простой, связанный с перезапуском оборудования, может привести к крупным финансовым потерям [13].

2. Косвенные затраты. Косвенные затраты менее очевидны, но могут быть столь же значительными. К ним относятся затраты, связанные с обслуживанием, ремонтом, сокращением срока службы оборудования и снижением эффективности из-за повторяющихся провалов напряжения. Кроме того, компании могут понести потерю репутации, если они не смогут удовлетворить спрос клиентов или ожидания по качеству продукции из-за проблем с качеством электроэнергии [14].

Провалы напряжения тесно взаимосвязаны с релейной защитой энергосистемы, поскольку устройства защиты как вызывают, так и смягчают провалы напряжения в зависимости от ситуации. Понимание этой взаимосвязи является ключевым фактором при минимизации негативных последствий провалов напряжения для обеспечения надежности системы.

Основной причиной провалов напряжения, как было упомянуто ранее, являются электрические неисправности в системе, такие как короткие замыкания. Когда происходит неисправность, ток, потребляемый системой, резко увеличивается, вызывая временный провал напряжения в точке неисправности и во всей затронутой сети. Устройства защиты энергосистемы предназначены для обнаружения этих неисправностей и максимально быстрой изоляции неисправного участка для восстановления нормальной работы.

Время, обнаружения и устранения неисправности с помощью релейной защиты, определяет глубину и продолжительность провала напряжения [15]. Если системе защиты требуется слишком много времени для обнаружения и устранения неисправности, провал напряжения может распространиться дальше в систему и длиться дольше. Это может повлиять на большее количество потребителей или технологических процессов. Хорошо скоординированная система защиты, которая быстро реагирует на неисправность, может ограничить серьезность и продолжительность провала напряжения, предотвращая его распространение по всей сети.

Зачастую при несогласованности проектных решений технологов и электриков системы защиты могут быть чрезмерно чувствительными или плохо скоординированными, что приводит к ненужному срабатыванию автоматических выключателей или реле. Такое чрезмерное срабатывание может вызвать непреднамеренные провалы напряжения, особенно если защитные устройства отключают части сети в ответ на незначительные нарушения, которые не должны были вызвать реакцию на неисправность [16]. Также следует учитывать то, что разное оборудование имеет различные допустимые границы по провалам напряжения в процентах от номинального, при котором сохраняется работоспособность оборудования. Например работоспособность пускателя электродвигателя сохраняется при провале напряжения до 50% длительностью 40 мс, тогда как контроллер электропривода постоянного тока обладает более высоким порогом чувствительности к провалам напряжения, и допустимым провалом для него является снижение значения напряжения на 12% длительностью менее 8 мс [17].

Обеспечение надлежащей координации между защитными устройствами сводит к минимуму вероятность каскадных неисправностей или непреднамеренного отключения, которые могут усугубить провалы напряжения. С учетом этого при проектировании системы электроснабжения промышленного предприятия необходимо производить выбор способов по стабилизации напряжения в системе.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Как было сказано ранее, величина и длительность образуют две важнейшие характеристики, определяющие явление провала напряжения. Поэтому инженерные мероприятия по снижению его воздействия на электрическую сеть также можно разделить на две категории:

- 1) средства уменьшения глубины провала напряжения [18]:
  - статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ);

- статический источник бесперебойного питания (ИБП);
  - динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН);
  - маховик;
  - аккумуляторная система хранения энергии BESS;
  - увеличение кратности форсировки возбуждения синхронных машин.
- 2) способы уменьшения длительности провала напряжения:
- быстродействующий автоматический ввод резерва (БАВР);
  - применение быстродействующих защит.

Рассмотрим каждый метод по отдельности.

**Статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ)** – представляет собой устройство с параллельным включением, которое внедряется в линии электропередачи переменного тока [19]. Его основными элементами являются силовые полупроводниковые устройства биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и такие пассивные элементы, как конденсаторы, резисторы и катушки индуктивности [20]. СТАТКОМ входит в группу устройств, относящихся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока FACTS [21]. FACTS (Flexible AC Transmission System) – это система, основной частью которой являются силовые электронные устройства и другие статические контроллеры для повышения управляемости и возможности передачи мощности, что обеспечивает более быструю реакцию по сравнению с системами, использующими электромеханическую базу [22]. Схема подключения СТАТКОМ к электрической сети показана на рис. 3.

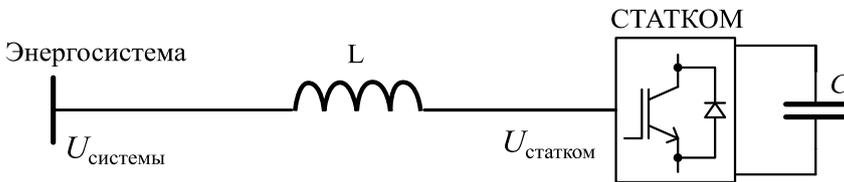


Рис. 3. Схема присоединения СТАТКОМ к сети

Fig. 3. A STATCOM installment

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основная часть СТАТКОМ состоит из статического преобразователя, который представлен в виде серии соединенных между собой транзисторов IGBT. Он может работать в двух режимах – генерации и потреблении реактивной мощности. Инверторы преобразуют постоянное напряжение, генерируемое конденсатором С, в переменное. С помощью трансформатора связи, изображенным в виде катушек индуктивности L, СТАТКОМ подключается к энергосистеме, что обеспечивает изоляцию между высоковольтной системой и номинальным напряжением статического компенсатора [23].

Для дальнейшего исследования СТАТКОМ важно рассмотреть вольтамперные характеристики, изображенные на рис. 4.

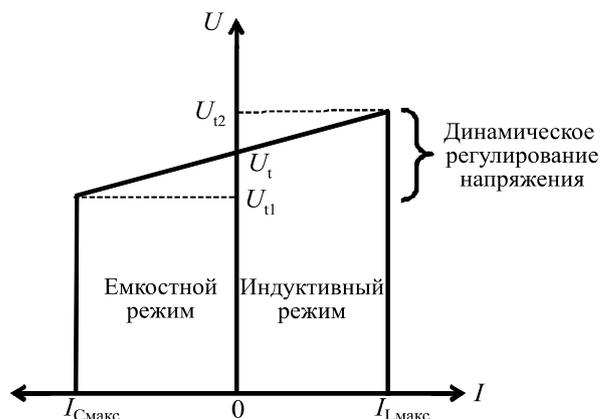


Рис. 4. Вольтамперная характеристика СТАТКОМ

Fig. 4. V-I Characteristics of STATCOM

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

$I_{Смакс}$  и  $I_{Лмакс}$  — предельные значения тока в емкостном или индуктивном режимах соответственно, которые могут быть обеспечены компенсатором.

На рисунке показаны два режима работы СТАТКОМ:

1. регулирование напряжения;
2. обеспечение баланса реактивной мощности в электрической сети.

В случае если напряжение на шине отклоняется от номинального значения  $U_t$  и колеблется между  $U_{t1}$  и  $U_{t2}$ , СТАТКОМ работает в режиме регулирования напряжения и обеспечивает поддержание напряжения на шине на номинальном значении. Если напряжение на шине падает ниже  $U_{t1}$  или поднимается выше  $U_{t2}$ , СТАТКОМ начинает контролировать реактивную мощность в сети путем подачи в систему емкостного или индуктивного тока.

По своим динамическим характеристикам, СТАТКОМ значительно превосходит другие компенсаторы реактивной мощности. Общее время отклика системы СТАТКОМ может достигать 10 мс [24]. Как показывают результаты моделирования, при провале напряжения до  $0,5U_{ном}$  в течение 150 мс СТАТКОМ способен повысить его до  $0,7U_{ном}$  [25]. Модифицированный СТАТКОМ для распределительных сетей так называемый Distributed STATCOM (D-STATCOM) при провале напряжения до  $0,1U_{ном}$  длительностью 0,1 с позволяет улучшить профиль напряжения до  $0,5U_{ном}$  [26]. Для регулирования напряжения такой СТАТКОМ целесообразно использовать на конце распределительной сети среднего напряжения или вблизи центров нагрузки [26]. Однако по сравнению с другими устройствами, используемыми для ликвидации провалов, СТАТКОМ неэффективен для устранения глубоких провалов напряжения [26]. Понимание этих ограничений помогает принимать обоснованные решения об использовании СТАТКОМ при проектировании энергосистем промышленных предприятий.

#### Статический источник бесперебойного питания

Источник бесперебойного питания (ИБП) — это электрическое устройство, которое обеспечивает аварийное питание нагрузки при отказе основного источника питания [28]. Он отличается от резервных генераторов тем, что ИБП обеспечивает почти мгновенную защиту от перебоев входного питания, поставляя энергию, накопленную в батареях, суперконденсаторах или маховиках. Такая короткая, но критически важная подача питания позволяет устройствам продолжать работу или корректно выключаться, избегая потенциального повреждения или потери данных [29].

Основной принцип работы системы ИБП основан на трех ключевых компонентах: выпрямитель, батарея и инвертор. На рис. 5 изображена структура простейшего резервного ИБП. Сначала выпрямитель преобразует входящий переменный ток от сети в постоянный ток, который используется для зарядки батареи ИБП. Затем батарея запасает энергию, которую можно использовать при отказе или колебаниях основного источника питания. Время работы батареи зависит от размера и типа ИБП и поддерживаемой им нагрузки. При прерывании подачи питания инвертор преобразует постоянный ток от батареи обратно в переменный ток, поставляя необходимую энергию подключенным устройствам.

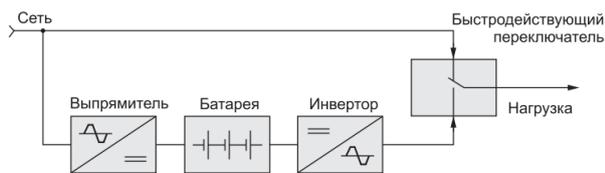


Рис. 5. Структура ИБП

Fig. 5. Structure of UPS

\*Источник: [30] Source: [30].

Такой плавный переход от основного источника питания к питанию от батареи гарантирует, что устройства будут продолжать работать без перебоев в случае провалов напряжений. В случае провала напряжения в энергосистеме быстродействующий переключатель обеспечивает переключение нагрузки на ИБП в течение 3-10 мс [30]. Обычно ИБП используются для создания систем бесперебойного электроснабжения (питания) инфокоммуникационных систем, таких как компьютеры и системы связи с инженерными системами [31].

Одним из главных недостатков при работе ИБП в аварийных ситуациях является наличие кратковременных перебоев электропитания длительностью от нескольких миллисекунд до половины периода питающего напряжения [30], также он компенсирует провалы напряжения только до  $0,6U_{ном}$ . Также необходимо учитывать, что данное устройство не подходит для обеспечения защиты электродвигателей от провалов напряжения.

### Динамический компенсатор искажений напряжения

Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) или динамический компенсатор провалов напряжения (ДКПН) [17] представляет собой последовательный компенсатор на основе силового электронного преобразователя, который способен регулировать напряжение низковольтной нагрузки при перенапряжениях и провалах в питающей электросети. Принципиальная схема ДКИН изображена на рис. 6.

Основными компонентами данного устройства являются [32]:

- вольтодобавочный трансформатор;
- фильтр гармоник;
- устройство накопления энергии;
- преобразователь напряжения (voltage source converter/VSC);
- система управления.

При нормальном напряжении в сети ДКИН находится в состоянии ожидания с заряженным накопителем энергии, роль которого выполняет конденсатор постоянного тока. В случае провала напряжения в энергосистеме контроллер системы управления посылает сигнал преобразователю напряжения. Преобразователь, выполненный на основе IGBT транзисторов, преобразует постоянное напряжение накопителя в переменное и в необходимом количестве выдает его в распределительную сеть через вольтодобавочный трансформатор, подключенный последовательно с нагрузкой. Таким образом происходит компенсация провалов напряжения в системе электроснабжения. На выходе преобразователя также подключаются пассивные фильтры гармоник для подавления высокочастотных гармоник напряжения преобразователя [33].

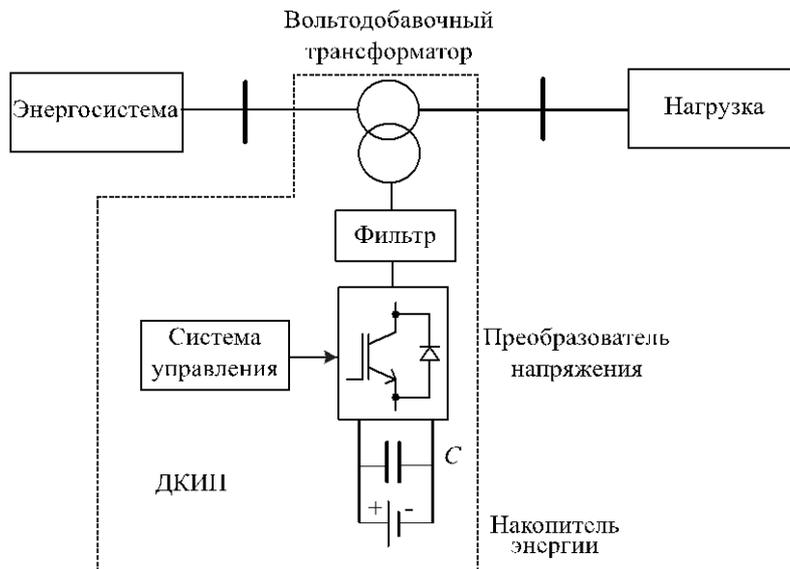


Рис. 6. Динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН) Fig. 6. Dynamic Voltage Restorer (DVR) voltage (DVR)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

ДКИН обеспечивает отклик на провал напряжения в течение 1-2 мс с последующим регулированием напряжения наполовину в течение 1 мс и полным восстановлением напряжения за 10 мс. ДКИН обеспечивает полную компенсацию провала напряжения в пределах номинального при перегрузках по току в  $2I_{ном}$  в течение не менее 30 с, частичную компенсацию при трехфазных провалах напряжения вплоть до  $0,5U_{ном}$  и однофазных провалах до  $0,55U_{ном}$  в течение не менее 30с [17]. Зачастую ДКИН применяется для защиты нагрузок от провалов напряжения при коротких замыканиях, возникающих в сетях внутреннего электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий [34]. Однако в [35] была продемонстрирована способность ДКИН без накопительных элементов эффективно обеспечивать кратковременное поддержание напряжения на нагрузке, подключенной к секциям распределительного устройства (РУ) 6 – 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП), при коротком замыкании в сетях внешнего электроснабжения 35 – 110 – 220 кВ.

### Маховик-генератор

Маховик-генератор — это инновационная и эффективная технология хранения энергии, которая использует кинетическую энергию для хранения и высвобождения

мощности. Используя вращающийся маховик в качестве среды для сохранения энергии, данная технология обеспечивает устойчивую и высокопроизводительную альтернативу традиционным решениям по хранению энергии, таким как батареи [36]. Вместе с тем данное устройство может применяться для защиты технологических процессов от провалов напряжений.

Принципиальная схема системы маховик-генератор изображена на рис. 7. Основными компонентами маховика-генератора являются:

- Маховик. Ротор большой массы, который хранит кинетическую энергию. Современные маховики изготавливаются из современных материалов, таких как углеродное волокно, для высокой прочности и снижения веса.
- Двигатель/генератор переменного тока. Машины двойного назначения, которые обрабатывают входную и выходную энергию, переключаясь между режимами двигателя и генератора по мере необходимости.
- Подшипники. Они поддерживают маховик и уменьшают трение. Магнитные подшипники или сверхпроводящие подшипники часто используются для работы практически без трения.
- Вакуумный корпус. Герметичная среда, которая снижает сопротивление воздуха, позволяя маховику эффективно вращаться на очень высоких скоростях.
- Система управления. Управляет потоком энергии, обеспечивая плавную работу и интеграцию с внешними энергетическими системами. Состоит из плат электронных схем и программируемого логического контроллера.

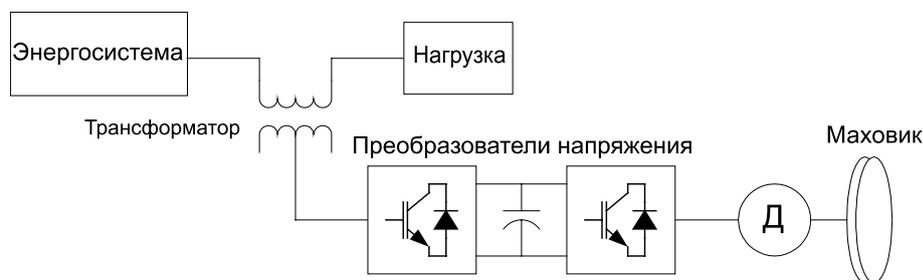


Рис. 7. Маховик-генератор

Fig. 7. Flywheel generator

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Принцип действия системы маховика с генератором основан на преобразовании электрической энергии в кинетическую и наоборот. Когда доступен избыток энергии, электродвигатель разгоняет маховик до высоких скоростей вращения. Этот процесс сохраняет энергию в виде вращательной кинетической энергии. В периоды спроса кинетическая энергия маховика преобразуется обратно в электрическую энергию с помощью генератора. Для минимизации трения и сопротивления воздуха используются усовершенствованные магнитные подшипники или вакуумная среда, что обеспечивает более длительное удержание энергии и большую эффективность.

Время реакции накопителя энергии с маховиком составляет до 4 мс [37]. Согласно существующим результатам моделирования работы данной системы при провале напряжения до  $0,6U_{ном}$  длительностью 34 мс маховик-генератор способен стабилизировать напряжение на уровне  $0,95U_{ном}$  (коррекцию провала можно выполнить до  $1,0U_{ном}$ , но это вызовет перенапряжения в конце периода провала, что может привести к повреждению изоляции) [38].

#### Аккумуляторная система хранения энергии

Система хранения энергии на основе аккумуляторных батарей (Battery Energy Storage System/BESS) — это тип технологии хранения энергии, которая использует аккумуляторы для хранения электроэнергии и ее распределения по мере необходимости. Она состоит из нескольких ключевых слаженно работающих компонентов [39]:

- Аккумуляторы — ядро системы, аккумуляторы могут различаться по типу, причем литий-ионные являются наиболее популярными из-за своей высокой плотности энергии, эффективности и снижения стоимости. Альтернативы, такие как свинцово-кислотные, проточные аккумуляторы и новые технологии, такие как твердотельные аккумуляторы, также используются в особых случаях.
- Система преобразования энергии (Power Conversion System/PCS) — это система, которая преобразует переменный ток (AC) из сети в постоянный ток (DC) для хранения в аккумуляторах и обратно в переменный ток при распределении энергии.

- Система управления аккумуляторами (Battery Management System/BMS) — обеспечивает безопасную и эффективную работу, контролируя такие параметры, как температура, напряжение, состояние работоспособности State-of-Health/SOH) и состояние заряда (State-of-Charge/SOC) [40]. Она также предотвращает перезарядку или глубокую разрядку, которые могут повредить аккумулятор.

- Система управления энергией (Energy Management System/EMS) — это программная система оптимизирует хранение и использование энергии, прогнозируя модели спроса и определяя наиболее экономически эффективное время для отпуска энергии.

#### **Увеличение кратности форсировки возбуждения синхронных машин**

В [41, 42] установлено, что одним из способов повышения уровня напряжения на промышленном производстве является увеличение кратности форсировки возбуждения синхронных генераторов и синхронных двигателей. Объектом исследования являлось влияние короткого замыкания во внешней электросети напряжением 110 кВ на работу типового узла системы электроснабжения промышленного потребителя напряжением 6-10 кВ, к которому были подключены синхронные машины. На основе метода математического моделирования в программной среде *MATLAB Simulink* был проведен ряд экспериментов с различными значениями мощности синхронных машин и удаленности КЗ от производства для выявления закономерностей влияния кратности форсировки возбуждения СМ на уровень остаточного напряжения. В ходе исследования была продемонстрирована способность синхронного генератора мощностью 16 МВт стабилизировать минимально допустимое напряжение на уровне  $0,8U_{ном}$  за счет четырехкратной форсировки возбуждения при снижении до 4 км зоны, в пределах которой все КЗ приводят к снижению напряжения на главной понизительной подстанции ниже технологически допустимого, а для синхронного двигателя такой же мощности эта зона должна быть примерно на 10% больше. В результате работы был сделан вывод о том, что синхронные машины, установленные в системе внутреннего электроснабжения промышленных предприятий, позволяют минимизировать уровень провалов напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения во внешней сети без дополнительных инвестиций.

#### **Быстрый автоматический ввод резерва**

Другой эффективной мерой по снижению влияния провалов напряжения на работу энергосистемы является уменьшение его длительности. Для достижения этой цели могут использоваться устройства автоматики и релейной защиты.

В последние годы разработаны и внедрены специфические устройства, обеспечивающие быстрое включение резерва (БАВР) на напряжение 6÷10 кВ. Они характеризуются малым периодом отключения питания, в ходе которого синхронные двигатели не успевают выйти из синхронизма, а асинхронные практически не меняют скорость вращения. Это дает возможность обеспечить минимизацию параметров самозапуска, снижая риск нарушения технологического процесса при коммутации приемников от одного источника к другому. Схема БАВР выполнена в виде бесконтактной (тиристорной) и контактной аппаратуры.

Автоматический ввод резерва (АВР) — это самодействующее интеллектуальное устройство переключения питания, управляемое специальной логикой управления. Основная цель АВР — обеспечить непрерывную подачу электроэнергии от одного из двух источников питания к подключенной цепи нагрузки (электрооборудование — освещение, двигатели, компьютеры и т. д.).

Логика управления или автоматический контроллер обычно основаны на микропроцессоре и постоянно отслеживают электрические параметры (напряжение, частоту) основных и альтернативных источников питания. При отказе подключенного источника питания АВР автоматически переключит цепь нагрузки на другой источник питания (если он доступен). Как правило, большинство автоматических переключателей резерва по умолчанию ищут подключение к основному источнику питания (сети) и подключаются к альтернативному источнику питания (двигателю-генератору, резервной сети) только при необходимости (отказ основного источника) или по запросу (команда оператора).

БАВР реагирует на аварийный режим в течение 3-9 мс [43] и осуществляет переключение на резервный ввод за 23-65 мс [43]. При моделировании работы БАВР была продемонстрирована способность устройства работать при провалах напряжения до  $0,5U_{ном}$  [44]. Однако в [45] отмечается, что применение АВР при провалах напряжения длительностью 1-3 с является нерациональным решением. Помимо этого, в [46]

утверждается, что проектирование собственного БАРВ на производстве представляет собой проблему, так как это усложняет схему электроснабжения и вносит проблему по селективности и равномерности загрузки вводов электропитания.

### Применение быстродействующих защит

Другой мерой по уменьшению длительности провалов напряжения, возникающих в системах электроснабжения промышленного предприятия, является повышение быстродействия релейной защиты.

Перспективным направлением для увеличения быстродействия релейной защиты является использование цифровых логических защит электроустановок. Все чаще при проектировании технического перевооружения энергообъектов используются системы, построенные по принципу абсолютной логической селективности. Данное понятие определяет систему, в которой в случае неисправности на линии координация между защитами достигается посредством их связи для автономного распознавания необходимого вмешательства с целью сокращения времени, необходимого для устранения неисправности, и минимизации участка электрической линии, необходимого для изоляции неисправности [47]. В этом случае микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) подстанции взаимодействуют с помощью дискретных сигналов, определяемых серией стандартов МЭК-61850 (IEC 61850). Основными характеристиками данного стандарта являются технологическая независимость, гибкость и расширяемость [48]. Характерная черта логических защит линий является — использование разрешающих команд, что значительно уменьшает возможность ложной работы при КЗ и ошибках персонала. Время действия данного процесса составляет около 200 мс [49].

На основе информации, изложенной в [49, 50], составлена схема организации логической защиты кабельных линий (Рис. 8). На концах защищаемой линии устанавливаются комплекты цифровой релейной защиты (ЦРЗА) с функцией максимальной токовой направленной защиты. Данные устройства обмениваются информацией с помощью приемопередатчиков дискретных команд (ППДК), которые в случае короткого замыкания подают команду на отключение линии. Волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛС) выступает в роли линии связи для ППДК, обычно идущая параллельно с линией электропередачи.

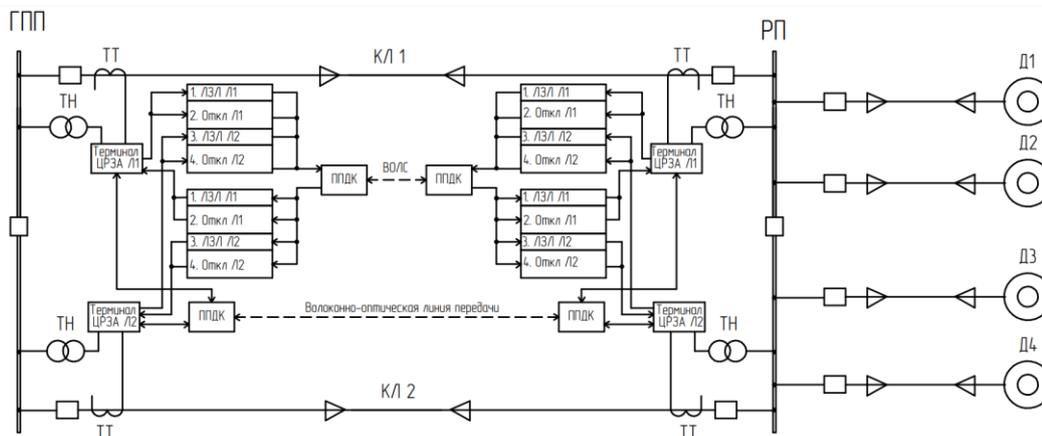


Рис. 8. Организация логической защиты

Fig. 8. Infrastructure of a logical protection system

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно разделу 8.1 стандарта МЭК-61850 для передачи сигналов управления, защиты и блокировок подстанции предназначен протокол GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) [51]. Использование данной технологии позволяет интегрировать управление и защиту энергообъектов подстанции в единое целое, что значительно повышает быстродействие обмена информацией в стандартизированном виде между оборудованием подстанции и за ее пределами. Например, внедрение устройств защит с локальной вычислительной сетью, обменивающихся данными по протоколам связи GOOSE, позволяет уменьшить время ввода резерва в 10 раз [52].

### Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В изложенном выше литературном обзоре представлен спектр разнообразных подходов к решению проблемы провалов напряжения в энергосистеме предприятия. На основе полученных данных составлена сравнительная Таблица 1, где приведены

максимальные величины глубины и длительности провалов напряжения, при которых рассматриваемые инженерные мероприятия способны эффективно поддерживать номинальный уровень напряжения в случае аварийной ситуации.

Таблица 1

Table 1

Сравнительные технические характеристики инженерных мероприятий по снижению воздействия провалов напряжения на электрическую сеть  
Comparative technical characteristics of engineering measures to reduce the impact of voltage failures on the electrical network

Наименование мероприятия	Величина провала напряжения, %	Длительность провала, мс
СТАТКОМ	50	150
D-СТАТКОМ	10	100
ИБП	60	10
ДКИН	50	10
Маховик-генератор	60	34
БАВР	50	65

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Приведённые в таблице цифры могут привести к ошибочному выводу о выборе СТАТКОМ как наиболее предпочтительному способу поддержания требуемого уровня напряжения. Как было продемонстрировано в предыдущих разделах статьи, каждый способ имеет свои достоинства и недостатки. Следовательно, применение того или иного метода должно обосновываться исходя из конкретных обоснований на основе моделирования работы промышленного предприятия при провалах напряжения. Исходной позицией для создания противоаварийных мероприятий является критическое время провала напряжения [16]. Оно определяет максимальный период времени работы оборудования после аварии, при котором не происходит нарушения технологического процесса. Данное понятие лежит в основе концепции времени невосприимчивости процесса для технологического оборудования [53], определение которого показано на рисунке 9.

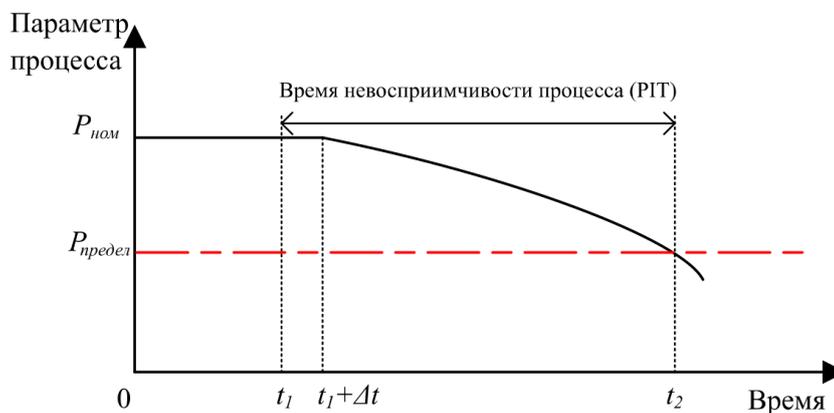


Рис.9. Определение времени невосприимчивости процесса

Fig. 9. Definition of PIT

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В момент времени  $t_1$  происходит провал напряжения, в результате чего параметр технологического процесса  $P_{ном}$  (давление, температура и т.п.) начинает отклоняться от своего номинального значения после задержки времени  $\Delta t$ . В момент времени  $t_2$  параметр пересекает границу  $P_{предел}$ , ниже которой технологический процесс не может нормально функционировать и должен быть либо остановлен, либо перезапущен. Промежуток от  $t_1$  до  $t_2$  называется временем невосприимчивости процесса (Process immunity time/PIT) и определяется по формуле (1).

$$PIT = t_2 - t_1 \quad (1)$$

Одним из главных препятствий при разработке мероприятий по устойчивости работы технологического процесса является то, что зачастую предприятия не знают время невосприимчивости процесса для каждого аппарата и никто не проектирует его заранее. При этом отдельное оборудование на производстве имеет свой цикл и свое критическое время провала в виду того, что каждый технологический процесс обладает своей спецификой и имеет свои наиболее чувствительные к кратковременным перерывам электроснабжения места. Поэтому инженеру-электрику на моменте проектирования необходимо провести комплексную оценку всего оборудования на отдельно взятом промышленном предприятии, собрать данные о процессе не только в электрической, но и технологической части. Затем, на основе полученной информации, выявляются критически важные агрегаты и вычисляются значения РИТ для каждого из них. В дальнейших работах предполагается подробно рассказать о методике определения значений времени невосприимчивости технологического процесса и продемонстрировать результаты экспериментальных исследований данного времени.

### **Заключение (Conclusions)**

1. Рассмотрены особенности электроснабжения современных промышленных предприятий. Приведены основные причины аварийных ситуаций в энергосистемах производств. Показано, что основной причиной нарушения работы технологического оборудования являются провалы напряжения. Дано определение понятия «провал напряжения» и описаны основные характеристики этого явления. Представлена классификация провалов напряжения в зависимости от их причины и места возникновения. Также описаны технологические и экономические последствия провалов напряжения для промышленного предприятия.

2. Приведен список основных средств и способов по борьбе с провалами напряжений. Рассмотрен один из наиболее эффективных устройств по стабилизации напряжения в сети — СТАТКОМ. Описан принцип действия СТАТКОМ, представлена иллюстрация его присоединения к сети и даны основные характеристики его работы. Также подробно расписаны другие методы устранения провалов напряжения: статический источник бесперебойного питания; маховик-генератор; быстрый ввод резерва; быстродействующие защиты.

3. Показано, что существующие способы и средства по стабилизации напряжения на промышленном предприятии имеют свои достоинства и недостатки. Сделан вывод о том, что главным фактором при проектировании мероприятий по противодействию провалам напряжения на производстве является время невосприимчивости процесса. Каждое оборудование имеет свое значение данного времени, что не учитывается на стадии проектирования. Это приводит к проблемам обеспечения стабильности напряжения.

Научная новизна исследования состоит в формулировке проблемы провалов напряжения на основе литературного обзора и предложении её решения через концепцию времени невосприимчивости процесса. Эта задача связана с обширным комплексом устройств промышленных предприятий, что позволяет в дальнейших исследованиях разработать методику для проектирования мероприятий по повышению стабильности напряжения на промышленном объекте.

### **Литература**

1. Суслов К.В., Солонина Н.Н., Солонина З.В., Ахметшин А.Р. Эффективный метод определения места короткого замыкания в электрических сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(2):71-83. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83>

2. Motoki É. M., Filho J. M. d. C., da Silveira P. M., Pereira N. B., & de Souza, P. V. G. (2021). Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies*, 14(10). pp. 2874.

3. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Состояние вопроса безотказности систем электроснабжения. Горные науки и технологии. 2017;(3):47-79. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-3-47-73>

4. Арцишевский Я.Л. Техперевооружение релейной защиты и автоматики систем электроснабжения предприятий непрерывного производства / Я. Л. Арцишевский, Е. А. Задкова, Ю. П. Кузнецов ; Я. Л. Арцишевский, Е. А. Задкова, Ю. П. Кузнецов. – Москва : НТФ "Энергопрогресс", 2011. – 93 с. – (Библиотечка электротехника : приложение к журналу "Энергетик"). – EDN QMLLPT.

5. Хамидулин, Р.Р. Применение современных технологий автоматизации в сетях электроснабжения литейного производства / Р. Р. Хамидулин // *Academy*. – 2019. – № 2(41). – С. 32-33. – EDN YWUFUHR.
6. Фетисов, Л.В. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения / Л. В. Фетисов, Н. В. Роженцова, О. А. Булатов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2018. – Т. 20, № 11-12. – С. 99-106. – DOI 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. – EDN YXRTWN.
7. Балабанов А.М. Анализ эффективности систем СТАТКОМ в задачах повышения качества электроэнергии горнодобывающего предприятия / А. М. Балабанов, С. В. Митрофанов // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 68-79. – EDN BYIVEL.
8. Шклярский, Я.Э. Определение напряжения звена постоянного тока частотного электропривода при провалах напряжения / Я. Э. Шклярский, А. И. Барданов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – № 12-2. – С. 447-456. – EDN ZXHANL.
9. Molnar-Matei F., Sorandaru C. LabVIEW implementation of tracking filters for voltage dip detection. *IEEE EuroCon*. 2013. pp. 897-902.
10. Смыков, Ю. Н. Управление процессами системы электроснабжения силовых электроприемников при провале напряжения / Ю. Н. Смыков, Е. Ю. Кислицин, М. Н. Иванов // *Успехи кибернетики*. – 2024. – Т. 5, № 1. – С. 61-68. – DOI 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08. – EDN KMDXYX.
11. Саттаров Р.Р. Исследование работы группы асинхронных двигателей при кратковременных провалах напряжения для условий нефтяной промышленности / Р. Р. Саттаров, Р. Р. Гарафутдинов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2020. – Т. 22, № 6. – С. 92-100. – DOI 10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100. – EDN PEXESR.
12. Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(4):90-104. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104>
13. Khaleel M., Yusupov Z., Elmifi M., Elmenfy T., Rajab Z., & Elbar, M. (2023). Assessing the Financial Impact and Mitigation Methods for Voltage Sag in Power Grid. *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 1(3), 10–26. Доступно по: <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/40> Ссылка активна на 16 января 2025.
14. Almeida D.R., Cebrian J.C. Effects of Voltage Sags on Industrial Processes: Case Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2021, pp. 565–573.
15. Корнилов Г.П., Коваленко А.Ю., Николаев А.А., и др. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2014. – № 2(23). – С. 44-48. – EDN SNOTPZ.
16. Гуревич Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков ; Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков. – Москва : Элекс-КМ, 2005. – 407 с. – ISBN 5-93815-025-6. – EDN QMIQZR.
17. Богданов И.А. Автоматическая система компенсации провалов напряжения в электроэнергетических системах судов с электродвижением / И. А. Богданов, Н. Д. Сенчило // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2020. – № 3-1(49). – С. 212-218. – DOI 10.37220/МИТ.2020.49.3.028. – EDN AGYUOD.
18. Ершов С.В. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения / С. В. Ершов, М. С. Пигалов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2017. – № 12-1. – С. 95-104. – EDN ZXGZJL.
19. Sharma S. et al. A Comprehensive Review on STATCOM: Paradigm of Modeling, Control, Stability, Optimal Location, Integration, Application, and Installation // *IEEE Access*. 2024. vol. 12, pp. 2701-2729. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345216.
20. Liang X. et al. Improved Hybrid Reactive Power Compensation System Based on FC and STATCOM and Its Control Method. // *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2022. vol. 8, no. 2, pp. 29-41. doi: 10.23919/CJEE.2022.000012.
21. Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Выбор схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в адаптивных сетях с тягой переменного тока. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022;24(3):42-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54>
22. Иванов И.Ю., Новокрещенов В.В., Иванова В.Р. Современное состояние проблем функционирования комплексов релейной защиты и автоматики, применяемых в активно-

- адаптивной сети. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(6):102-123. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123>
23. Dilshad S., Abas N., Farooq H., A. R. Kalair and A. A. Memon. NeuroFuzzy Wavelet Based Auxiliary Damping Controls for STATCOM. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 200367-200382. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031934.
24. Qingguang Y., Pei L., Wenhua L. and Xiaorong X. Overview of STATCOM technologies. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings, Hong Kong, China, 2004, pp. 647-652 Vol.2, doi: 10.1109/DRPT.2004.1338063.
25. Hamdan I., Ibrahim A.M.A., Noureldeen O. Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag // SN Appl. Sci. 2020. N2, p. 364. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2169-6>
26. Sharma V., Chandrakar V. Power Quality Enhancement by minimizing the effect of Voltage Sag in Non-linear Load Using D-STATCOM // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2325. 012019. 10.1088/1742-6596/2325/1/012019.
27. Du Z., Chen Z., Dai G., et al. Influence of DVR on Adjacent Load and Its Compensation Strategy Design Based on Externality Theory // Energies 2019, 12, 3716. <https://doi.org/10.3390/en12193716>
28. Уметалиев С.Д., Галбаев Ж.Т., Борукуев Т.С., Галбаев А.Ж.. Повышение качества стабилизации выходных параметров источника бесперебойного питания для ветроустановок // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2024. № 3(71). С. 978-983. DOI 10.56634/16948335.2024.2.978-983. – EDN UFXDGD.
29. Oliveira T., Caseiro L., Mendes, A., Cruz S., Perdigão M. Model Predictive Control for Paralleled Uninterruptible Power Supplies with an Additional Inverter Leg for Load-Side Neutral Connection // Energies 2021, 14, 2270. <https://doi.org/10.3390/en14082270>
30. Гуревич В. Источники бесперебойного электропитания: устройство, принципы действия и применение / В. Гуревич // Силовая электроника. – 2012. – Т. 6, № 39. – С. 63-70. – EDN PJWKFN.
31. Caseiro L., Mendes A. Fault Analysis and Non-Redundant Fault Tolerance in 3-Level Double Conversion UPS Systems Using Finite-Control-Set Model Predictive Control // Energies 2021, 14, 2210. <https://doi.org/10.3390/en14082210>
32. Pandian S. Voltage Sag Compensation in Fourteen Bus System Using IDVR // International Journal of Engineering and Technology. 2017; 4. pp.183-186. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I338.pdf>. Accessed: 12 Nov 2024.
33. Mbuli N. Dynamic Voltage Restorer as a Solution to Voltage Problems in Power Systems: Focus on Sags, Swells and Steady Fluctuations // Energies 2023, 16, 6946. <https://doi.org/10.3390/en16196946>
34. Ивкин О.Н., Киреева Э.А., Пупин В.М. и др. Применение динамических компенсаторов искажения напряжения с целью обеспечения надежности электроснабжения потребителей // Главный энергетик. 2006. №1. С. 28-31.
35. Федотов А.И., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А., Леухин А.Н. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015;(3-4):36-41. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41>
36. Dai X., Ma X., Hu D., Duan J., Chen H. An Overview of the R&D of Flywheel Energy Storage Technologies in China // Energies 2024, 17, 5531. <https://doi.org/10.3390/en17225531>
37. Guorui R., Jinfu L., Jie W., et al. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions // Applied Energy. 2017; 204:47-65. 10.1016/j.apenergy.2017.06.098.
38. Samineni S., Johnson B.K., Hess H., Law J.D. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for Voltage sag correction // Industry Applications, IEEE Transactions on. 2006; 42: 42 - 52. 10.1109/TIA.2005.861366.
39. Nor Anwar I. B., Hussain M. N. M., Noor S. Z. M., et al. Micro-Grid of Battery Energy Storage System (BESS) Design for Malaysia's Net Energy Metering (NEM) // E3S Web of Conferences. 2024; Vol. 473: p. 02001. doi 10.1051/e3sconf/202447302001
40. Lawder M. T. et al. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications // Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451
41. Федотов А.И., Бахтеев К.Р. Влияние форсировки возбуждения синхронных машин на уровень остаточного напряжения при кратковременных нарушениях электроснабжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(7-8):64-71. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-7-8-64-71>
42. Bakhteev K., Fedotov A, Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

43. Грунтович Н. В., Капанский А. А., Пупин В. М., Сафонов Д. О., Фёдоров О. В. Влияние работающих двигателей на остаточные напряжения узлов комплексной нагрузки станций // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2021. №2 (85). Доступно по: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-rabotayuschih-dvigatelay-na-ostatochnye-napryazheniya-uzlov-kompleksnoy-nagruzki-stantsiy> (дата обращения: 16.12.2024).

44. Червоненко А.П., Котин Д.А., Рожко А.В. Перевод нагрузки с основной сети на резервную с применением типового АВР. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(5):160-171. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-160-171>

45. Храмшин Т.Р. Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – № 2 (14). – С.80–87.

46. Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Карандаева О.И. и др. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения // Вестник МГТУ. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. – № 4. – С. 79–84.

47. Jafary P., Supponen A., Salmenperä M., Repo S. Analyzing Reliability of the Communication for Secure and Highly Available GOOSE-Based Logic Selectivity // Security and Communication Networks. 2019, 9682189: 16. <https://doi.org/10.1155/2019/9682189>

48. Акулова А. С. Формирование сообщений на цифровых // XX Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартовского государственного университета : сборник статей, Нижневартовск, 03–04 апреля 2018 года. Том 1. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2018. – С. 425-428. – EDN YACYLJ.

49. Емельянцева А., Филин Л. Линии 6–10 кВ между электростанциями и энергосистемой. быстродействующая логическая защита // Новости электротехники. 2021. №2(128)–№3(129). Доступно по: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/45/11.php> (дата обращения: 20.01.2025).

50. Исаков Р.Г., Гарке В.Г. Концепция развития релейной защиты системы электроснабжения крупного промышленного предприятия. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2012;(7-8):46-54.

51. Давыдов А., Холмов М. А., Никитин К. И., Клецель М. Я. Способ построения защиты линии с применением стандарта МЭК 61850 на примере микропроцессорного терминала Sepam серии 1000+ // Омский научный вестник. – 2024. – № 2(190). – С. 87-98. – DOI 10.25206/1813-8225-2024-190-87-98. – EDN EYIQKX.

52. Пфафенрот, Е. В. Организация цифровой логической защиты электроустановок НПЗ. Примеры внедрения, перспективы применения // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, 18–21 апреля 2023 года / сборник докладов VII международной научно-практической конференции. – Чебоксары: Б. и., 2023. – С. 143-147. – EDN RATKCZ.

53. Bollen M. H. J. et al. CIGRE/ CIREN/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations - Main contributions and conclusions // CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1. Prague, Czech Republic, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2009.0584.

### Авторы публикации

**Тухватуллин Леонид Тимурович** – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). [tukhvatullint@stud.kai.ru](mailto:tukhvatullint@stud.kai.ru).

**Исаков Руслан Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрооборудование» (ЭО) Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). [ruslanisakov@yandex.ru](mailto:ruslanisakov@yandex.ru).

### References

1. Suslov K.V., Solonina N.N., Solonina Z.V., Akhmetshin A.R. Operational determination of the point of a short circuit in power lines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(2):71-83. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-71-83>

2. Motoki, É. M., Filho, J. M. d. C., da Silveira, P. M., Pereira, N. B., & de Souza, P. V. G. (2021). Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies*, 14(10), 2874. <https://doi.org/10.3390/en14102874>

3. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Zatsepina V.I., Zatsepina E.P. State of the issue of the power supply system's reliability. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2017;(3):47-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-3-47-73>

4. Artsishevskii YaL. *Tekhperevooruzhenie releinoi zashchity i avtomatiki sistem*

- elektrosnabzheniya predpriyatii nepreryvnogo proizvodstva*. Moscow: NTF "Energoprogress"; 2011. (In Russ).
5. Khamidulin RR. Primenenie sovremennykh tekhnologii avtomatizatsii v setyakh elektrosnabzheniya liteinogo proizvodstva. *Academy*. 2019; 41(2):32-33. (In Russ).
  6. Fetisov L.V., Rozhencova N.V., Bulatov O.A. IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRIC POWER IN LOW VOLTAGE NETWORKS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>
  7. Balabanov AM, Mitrofanov SV. Analiz effektivnosti sistem STATKOM v zadachakh povysheniya kachestva elektroenergii gornodobyvayushchego predpriyatiya. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2023; 15(57(1)):68-79. (In Russ).
  8. Shklyarskii YaE, Bardanov AI. Opredelenie napryazheniya zvena postoyannogo toka chastotnogo elektroprivoda pri provalakh napryazheniya. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017; 12(2):447-456. (In Russ).
  9. Molnar-Matei F., Sorandaru C. LabVIEW implementation of tracking filters for voltage dip detection. *IEEE EuroCon*. 2013. pp. 897-902. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625089.
  10. Smykov YuN, Kislitsin EYu, Ivanov MN. Upravlenie protsessami sistemy elektrosnabzheniya silovykh elektropriemnikov pri provale napryazheniya. *Uspekhi kibernetiki*. 2024; 5(1):61-68. (In Russ). doi: 10.51790/2712-9942-2024-5-1-08.
  11. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Research of the operation of a group of asynchronous motors at short-term voltage slopes for the conditions of the oil industry. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):92-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-92-100>
  12. Chervonchenko S.S., Frolov V.Ya. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):90-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104>
  13. Khaleel, M., Yusupov, Z., Elmif, M., Elmenfy, T., Rajab, Z., & Elbar, M. (2023). Assessing the Financial Impact and Mitigation Methods for Voltage Sag in Power Grid. *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 1(3), 10–26. Retrieved from <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/40> Accessed: 16 Jan 2025.
  14. Almeida D., Cebrian J. Effects of Voltage Sags on Industrial Processes: Case Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2021, pp. 565–573. doi:10.46254/sa02.20210301
  15. Kornilov G. P., Kovalenko A. Yu., Nikolaev A. A. Ogranichenie provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2014; 23(2): 44-48. (In Russ).
  16. Gurevich Yu. E., Kabikov K. V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboinuyu rabotu promyshlennogo potrebitelya*. Moscow: Eleks-KM; 2005. (In Russ).
  17. Bogdanov I. A., Senchilo N. D. Avtomaticheskaya sistema kompensatsii provalov napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh sudov s elektrodvizheniem. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2020; 49(3-1): 212-218. (In Russ). DOI 10.37220/MIT.2020.49.3.028.
  18. Ershov S. V., Pigalov M. S. Analiz sredstv i sposobov ogranicheniya vliyaniya provalov napryazheniya. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017. 12(1):95-104. (In Russ).
  19. Sharma S. et al., A Comprehensive Review on STATCOM: Paradigm of Modeling, Control, Stability, Optimal Location, Integration, Application, and Installation. *IEEE Access*. 2024. vol. 12, pp. 2701-2729. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345216.
  20. Liang X. et al. Improved Hybrid Reactive Power Compensation System Based on FC and STATCOM and Its Control Method. *Chinese Journal of Electrical Engineering*. 2022. Vol. 8, no. 2, pp. 29-41. doi: 10.23919/CJEE.2022.000012.
  21. Savina N.V., Lisogurskiy I.A., Lisogurskaya L.N. Selection of circuit and technical solutions for improvement the quality of electricity in adaptive networks with traction AC power. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):42-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54>
  22. Ivanov I.Yu., Novokreshchenov V.V., Ivanova V.R. Current state of the problems of functioning of relay protection and automation complexes used in an active adaptive network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):102-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-102-123>
  23. Dilshad S., Abas N., Farooq H., et al. NeuroFuzzy Wavelet Based Auxiliary Damping Controls for STATCOM. *IEEE Access*. 2020. 8:200367-200382. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031934.
  24. Qingguang Y., Pei L., Wenhua L. and Xiaorong X.. Overview of STATCOM technologies. *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*.

*Proceedings, Hong Kong, China, 2004*, pp. 647-652 Vol.2, doi: 10.1109/DRPT.2004.1338063.

25. Hamdan I., Ibrahim A.M.A. and Nourdeeden O. Modified STATCOM control strategy for fault ride-through capability enhancement of grid-connected PV/wind hybrid power system during voltage sag. *SN Appl. Sci.* 2, 364 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2169-6>

26. Sharma V., Chandrakar V. Power Quality Enhancement by minimizing the effect of Voltage Sag in Non-linear Load Using D-STATCOM. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. 2325. 012019. 10.1088/1742-6596/2325/1/012019.

27. Du Z., Chen Z., Dai G., et al. Influence of DVR on Adjacent Load and Its Compensation Strategy Design Based on Externality Theory. *Energies* 2019, 12, 3716. <https://doi.org/10.3390/en12193716>

28. Umetaliev S. D., Galbaev Zh. T., Borukeev T. S., Galbaev A. Zh. Povyshenie kachestva stabilizatsii vykhodnykh parametrov istochnika bospereboinogo pitaniya dlya vetroustanovok. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2024; 71(3):978-983. (In Russ) doi: 10.56634/16948335.2024.2.978-983

29. Oliveira T., Caseiro L., Mendes, A., Cruz S., Perdigão M. Model Predictive Control for Paralleled Uninterruptible Power Supplies with an Additional Inverter Leg for Load-Side Neutral Connection. *Energies* 2021, 14, 2270. <https://doi.org/10.3390/en14082270>

30. Gurevich V. Istochniki bospereboinogo elektropitaniya: ustroystvo, printsipy deistviya i primeneniye. *Silovaya elektronika*. 2012. Pt. 6, 39:63-70. (In Russ).

31. Caseiro L., Mendes A. Fault Analysis and Non-Redundant Fault Tolerance in 3-Level Double Conversion UPS Systems Using Finite-Control-Set Model Predictive Control. *Energies* 2021, 14, 2210. <https://doi.org/10.3390/en14082210>

32. Pandian S. Voltage Sag Compensation in Fourteen Bus System Using IDVR. *International Journal of Engineering and Technology*. 2017; 4. pp.183-186. <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I338.pdf>

33. Mbuli N. Dynamic Voltage Restorer as a Solution to Voltage Problems in Power Systems: Focus on Sags, Swells and Steady Fluctuations. *Energies* 2023, 16, 6946. <https://doi.org/10.3390/en16196946>

34. Ivkin O.N., Kireeva E.A., Pupin V.M. Primeneniye dinamicheskikh kompensatorov iskazheniya napryazheniya s tsel'yu obespecheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya potrebitel'ei. *Glavnyi energetik* 2006; 1: 28-31. (In Russ).

35. Fedotov A.I., Kuznetsov R.V., Fedotov E.A., Leuhin A.N. Effect of dynamic compensators voltage distortion on the power quality during faults on the electrical networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(3-4):36-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41>

36. Dai X., Ma X., Hu D., Duan J., Chen H. An Overview of the R&D of Flywheel Energy Storage Technologies in China. *Energies* 2024, 17, 5531. <https://doi.org/10.3390/en17225531>

37. Guorui R., Jinfu L., Jie W., et al. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions. *Applied Energy*. 2017; 204:47-65. 10.1016/j.apenergy.2017.06.098.

38. Samineni S., Johnson B.K., Hess H., Law J.D. Modeling and analysis of a flywheel energy storage system for Voltage sag correction. *Industry Applications, IEEE Transactions on*. 2006; 42: 42 - 52. 10.1109/TIA.2005.861366.

39. Nor Anwar I. B., Hussain M. N. M., Noor S. Z. M., et al. Micro-Grid of Batteray Energy Storage System (BESS) Design for Malaysia's Net Energy Metering (NEM). *E3S Web of Conferences*. 2024; Vol. 473: p. 02001. doi 10.1051/e3sconf/202447302001

40. Lawder M. T. et al. Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications. *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2317451

41. Fedotov A.I., Bakhteev K.R. Vliyanie forsirovki vobzuzhdeniya sinkhronnykh mashin na uroven' ostatochnogo napryazheniya pri kratkovremennykh narusheniyakh elektrosnabzheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2016;(7-8):64-71. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-7-8-64-71>. (In Russ).

42. Bakhteev K., Fedotov A, Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages. *Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

43. Gruntovich N. V., Kapanskii A. A., Pupin V. M., Safonov D. O., Fedorov O. V. Vliyanie rabotayushchikh dvigatelei na ostatochnye napryazheniya uzlov kompleksnoi nagruzki stantsii. *Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo*. 2021. 85(2). (In Russ).

44. Chervonenko A.P., Kotin D.A., Rozhko A.V. Load switching between main power grid to the backup grid by standard automatic transfer switch. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):160-171. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-160-171>

45. Khramshin T.R. Sposoby povysheniya ustoichivosti elektroprivodov nepreryvnykh proizvodstv

pri provalakh napryazheniya. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2014; 14(2):80–87. (In Russ.)

46. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I. Sposoby povysheniya ustoychivosti chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov pri narusheniyakh elektrosnabzheniya. *Vestnik MGTU*. 2011 Magnitogorsk: GOU VPO «MGTU» 4: 79–84. (In Russ.).

47. Jafary P., Supponen A., Salmenperä M., Repo S. Analyzing Reliability of the Communication for Secure and Highly Available GOOSE-Based Logic Selectivity. *Security and Communication Networks*. 2019, 9682189: 16. <https://doi.org/10.1155/2019/9682189>

48. Akulova, AS. Formirovanie soobshchenii na tsifrovyykh podstantsiyakh. In: Akulova AS, Pecheritsa AS. *XX Vserossiiskaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta; 03–04 Apr 2018; Nizhnevartovsk, Russia*. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovskii gosudarstvennyi universitet, 2018. Pt. 1. pp. 425–428. (In Russ.).

49. Emel'yantsev A., Filin L. Linii 6–10 kV mezhdru elektrostantsiyami i energosistemoi. bystrodeistvuyushchaya logicheskaya zashchita. *Novosti elektrotekhniki*. 2021. 2(128)–3(129). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/45/11.php>. Accessed: 20 Jan 2025. (In Russ.).

50. Isakov R.G., Garke V.G. Kontseptsiya razvitiya releinoi zashchity sistema elektrosnabzheniya krupnogo promyshlennogo predpriyatiya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2012;(7-8):46-54. (In Russ.).

51. Davydov D.A., Kholmov M.A., Nikitin K.I., Kletsel' M.Ya. Sposob postroeniya zashchity linii s primeneniem standarta MEK 61850 na primere mikroprotsessornogo terminala Sepam serii 1000+. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2024; 2(190):87–98. DOI:<https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-190-87-98>. (In Russ.).

52. Pfafenrot EV. Organizatsiya tsifrovoi logicheskoi zashchity elektroustanovok NPZ. Primery vnedreniya, perspektivy primeneniya. In: Pfafenrot EV. *VII nauchno-prakticheskaya konferentsiya „Releinaya zashchita i avtomatizatsiya elektroenergeticheskikh sistem Rossii“; 18–21 Apr. 2023; Cheboksary, Russia*. Cheboksary: Chuvashskii gosudarstvennyi universitet imeni I.N. Ul'yanova, 2023. pp. 143-147. (In Russ.).

53. Bollen M. H. J. et al. CIGRE/ CIREN/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations - Main contributions and conclusions. *CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1*. Prague, Czech Republic, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2009.0584.

#### Authors of the publication

**Leonid T. Tukhvatullin** - Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev, Kazan, Russia. [tukhvatullinlt@stud.kai.ru](mailto:tukhvatullinlt@stud.kai.ru).

**Ruslan G. Isakov** - Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev, Kazan, Russia. [ruslanisakov@yandex.ru](mailto:ruslanisakov@yandex.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

**Получено** 25.02.2025 г.

**Отредактировано** 23.03.2025 г.

**Принято** 30.04.2025 г.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В MATLAB

Петров Т.И.

Казанский государственный энергетический университет  
г. Казань, Россия  
[tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru)

**Резюме:** В данном исследовании разработана методика оптимизации конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) с использованием генетического алгоритма, направленная на повышение энергоэффективности и снижение пульсаций момента. ЦЕЛЬ работы заключалась в определении оптимальных геометрических параметров двигателя, включая угол охвата магнитов, толщину магнитов, ширину зубца статора, глубину паза и воздушный зазор, с учетом технологических ограничений и электромагнитных характеристик. МЕТОДОЛОГИЯ основана на комбинации аналитического моделирования магнитных цепей и генетического алгоритма, реализованного в MATLAB, с многоцелевой фитнес-функцией, учитывающей крутящий момент, пульсации и КПД. РЕЗУЛЬТАТЫ демонстрируют, что предложенный подход позволяет достичь значительного улучшения характеристик: увеличение момента на 8,9%, снижение пульсаций на 40% и повышение КПД на 3,5 процентных пункта по сравнению с базовой конфигурацией. Установлено, что оптимальная конфигурация достигается при угле охвата магнитов  $72^\circ$  и воздушном зазоре 0,85 мм, что подтверждает необходимость применения современных оптимизационных методов для поиска нетривиальных технических решений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования энергоэффективных двигателей, сокращая время разработки. Исследование вносит вклад в развитие методов компьютерного проектирования электрических машин, демонстрируя эффективность генетических алгоритмов для решения сложных многокритериальных задач электромеханики.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель; оптимизация; ротор; статор; магниты; генетический алгоритм; MATLAB.

**Благодарности:** Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

**Для цитирования:** Петров Т.И. Реализация оптимизации синхронного двигателя на основе генетического алгоритма в MATLAB // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 102-109. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-102-109.

## IMPLEMENTATION OF SYNCHRONOUS MOTOR OPTIMIZATION BASED ON GENETIC ALGORITHM IN MATLAB

Petrov T.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
[tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru)

**Abstract:** In this study, a genetic algorithm-based design optimization methodology for a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is developed to improve energy efficiency and reduce torque pulsation. The OBJECTIVE of the study was to determine the optimal motor geometric parameters, including magnet wrap angle, magnet thickness, stator tooth width, slot

depth, and air gap, taking into account technological constraints and electromagnetic characteristics. The METHODOLOGY is based on a combination of analytical modeling of magnetic circuits and a genetic algorithm implemented in MATLAB with a multi-objective fitness function that takes into account torque, pulsation, and efficiency. The RESULTS demonstrate that the proposed approach achieves significant performance improvements: an 8.9% increase in torque, a 40% decrease in pulsation, and a 3.5 percentage point increase in efficiency compared to the baseline configuration. It was found that the optimal configuration is achieved with a magnet coverage angle of  $72^\circ$  and an air gap of 0.85 mm, which confirms the need to use modern optimization methods to find non-trivial technical solutions. CONCLUSION. The results obtained are of practical importance for designing energy-efficient motors, reducing development time. The study contributes to the development of computer-aided design methods for electrical machines, demonstrating the effectiveness of genetic algorithms for solving complex multi-criteria problems of electromechanics.

**Keywords:** synchronous motor; optimization; rotor; stator; magnets; genetic algorithm; MATLAB.

**Acknowledgments:** The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan."

**For citation:** Petrov T.I. Implementation of synchronous motor optimization based on genetic algorithm in Matlab. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3):102-109. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-102-109.

#### **Введение и литературный обзор (Introduction and literature review)**

В последние годы генетические алгоритмы (ГА) активно применяются для оптимизации электромагнитных характеристик синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Исследования показывают, что ГА демонстрируют высокую эффективность при решении многокритериальных задач, связанных с улучшением крутящего момента, снижением пульсаций и минимизацией потерь. В работах последних пяти лет особое внимание уделяется комбинации ГА с методами машинного обучения и суррогатным моделированием для ускорения вычислительного процесса.

Ряд исследований посвящен оптимизации формы постоянных магнитов с целью снижения гармонических искажений магнитного поля. В работе [1] предложен модифицированный ГА с адаптивными операторами мутации, позволивший уменьшить пульсации момента на 15–20% по сравнению с традиционными конфигурациями. Аналогичные результаты получены в исследовании [2], где комбинация ГА и метода конечных элементов (МКЭ) использовалась для оптимизации сегментированных магнитов в СДПМ с дробными пазами. Авторы отмечают, что такой подход обеспечивает не только снижение акустического шума, но и улучшение КПД двигателя.

Важным направлением является интеграция ГА с методами глубокого обучения для сокращения времени расчетов. В работе [3] предложена гибридная модель, в которой нейросеть прогнозирует электромагнитные параметры двигателя на основе данных, полученных в ходе предварительных МКЭ-симуляций. Это позволило сократить время оптимизации в 5–7 раз без потери точности. Аналогичный подход использован в исследовании [4], где сверточные нейронные сети применялись для быстрой оценки влияния геометрии статора на потери в стали.

В исследовании [5] ГА применялся для одновременного улучшения момента, эффективности и массогабаритных показателей двигателя. Авторы использовали метод Парето-оптимизации, что позволило получить набор компромиссных решений для различных применений. Схожие результаты представлены в работе [6], где акцент сделан на оптимизацию тепловых характеристик двигателя за счет изменения топологии системы охлаждения.

Перспективным направлением считается применение ГА в сочетании с аддитивными технологиями. В исследовании [7] продемонстрировано, что генетическая оптимизация

позволяет создавать нестандартные формы магнитопровода, которые невозможно изготовить традиционными методами.

В работах последних лет также рассматриваются вопросы повышения надежности двигателей за счет оптимизации механических напряжений в конструкции. Например, в исследовании [8] ГА использовался для минимизации деформаций ротора при высоких скоростях вращения, что особенно актуально для применений в электромобилях. Авторы отмечают, что такой подход позволяет увеличить срок службы двигателя на 20–30%.

Таким образом, современные исследования подтверждают высокую эффективность генетических алгоритмов для топологической оптимизации СДПМ. Основными тенденциями являются интеграция ГА с методами ИИ, развитие многокритериальных подходов и адаптация алгоритмов для работы с аддитивными технологиями. Эти направления открывают новые возможности для создания энергоэффективных и компактных электродвигателей следующего поколения.

В современных исследованиях также отмечается растущая роль генетических алгоритмов в решении задач оптимизации с учетом технологических ограничений производства. Работа [9] демонстрирует, как ГА может эффективно учитывать производственные допуски и возможные отклонения параметров при проектировании СДПМ, что существенно повышает робастность конечных решений. Особый интерес представляет применение адаптивных схем оптимизации, где параметры самого генетического алгоритма динамически изменяются в процессе поиска оптимального решения, как показано в исследованиях [10].

В работе [11] подробно анализируются расхождения между прогнозируемыми характеристиками оптимизированного двигателя и реальными измерениями на прототипе. Авторы предлагают методику коррекции фитнес-функции на основе экспериментальных данных, что позволяет повысить точность последующих итераций оптимизации.

Перспективным направлением развития ГА для задач оптимизации СДПМ является их интеграция с цифровыми двойниками двигателей. Исследование [12] показывает, как непрерывное обновление цифровой модели на основе данных с датчиков работающего двигателя позволяет проводить адаптивную оптимизацию параметров в реальном времени.

В исследовании [13] генетический алгоритм применяется для комплексной оптимизации не только геометрических параметров двигателя, но и стратегий управления, что позволяет достичь синергетического эффекта в снижении энергопотребления. Авторы отмечают, что такой целостный подход обеспечивает дополнительные 5-7% повышения КПД системы в целом.

Актуальной остается проблема вычислительной сложности оптимизационных процедур. В работе [14] предлагается оригинальный подход к распараллеливанию вычислений при использовании ГА, позволяющий сократить время оптимизации сложных многопараметрических моделей в 8-10 раз. Это особенно важно при проектировании специализированных СДПМ для аэрокосмической отрасли, где требования к точности расчетов особенно высоки.

Современные исследования также затрагивают вопросы стандартизации и автоматизации процесса оптимизации. В публикации [15] обсуждаются перспективы создания унифицированных платформ для генетической оптимизации электродвигателей, которые могли бы интегрировать различные методы моделирования и оптимизации в единый рабочий процесс. Это позволило бы существенно снизить порог входа для инженеров, не являющихся специалистами в области эволюционных вычислений.

Последние тенденции показывают, что генетические алгоритмы продолжают развиваться как мощный инструмент проектирования СДПМ, постепенно трансформируясь из академического инструмента в промышленную технологию. Будущее этого направления связано с дальнейшей интеграцией ГА в CAD/CAE системы, развитием облачных платформ для распределенных вычислений и созданием специализированных алгоритмов для конкретных классов задач электромеханики. Как отмечают эксперты, это позволит вывести процесс проектирования электрических машин на качественно новый уровень эффективности и точности.

Научная новизна заключается в применении генетических алгоритмов для совместной оптимизации формы постоянных магнитов и топологии пазов статора с учетом нелинейных магнитных свойств материалов и вихревых токов, что позволило преодолеть ограничения классических методов, работающих только с одним компонентом двигателя. Практическая значимость проявляется в создании промышленно применимых методик топологической оптимизации двигателей, учитывающих реальные производственные

ограничения и обеспечивающих повышение энергоэффективности на 5-15% при одновременном снижении себестоимости изготовления.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

Методология исследования базируется на системном подходе, объединяющем аналитические методы расчета электромагнитных процессов с современными эволюционными алгоритмами поиска оптимальных решений. В основе разработанного подхода лежит комплексная математическая модель синхронного двигателя, учитывающая взаимосвязь геометрических параметров конструкции с его энергетическими характеристиками.

Электромагнитная модель двигателя строится на принципах теории магнитных цепей с учетом нелинейных свойств магнитных материалов и особенностей распределения магнитного поля в рабочем зазоре. Особое внимание уделено моделированию взаимодействия между постоянными магнитами ротора и зубцово-пазовой зоной статора, что позволяет адекватно оценивать основные рабочие характеристики двигателя. Пространство оптимизируемых параметров включает ключевые геометрические характеристики магнитной системы и пазовой зоны статора.

Многоцелевая функция оптимизации формируется как взвешенная комбинация трех ключевых показателей эффективности работы двигателя. Относительный вес каждого критерия отражает его важность с точки зрения эксплуатационных требований. При этом учитывается необходимость компромисса между конкурирующими характеристиками.

Реализация генетического алгоритма основана на современных подходах к эволюционным вычислениям. Используются адаптивные операторы селекции, скрещивания и мутации, обеспечивающие эффективное исследование пространства параметров. Особенностью алгоритма является динамическая адаптация параметров поиска в процессе оптимизации, что позволяет сочетать глобальный поиск с локальным уточнением решений.

Теоретической основой метода служат фундаментальные принципы электромеханики, теория проектирования электрических машин и современные подходы к многокритериальной оптимизации. Разработанная методика обеспечивает учет сложных нелинейных взаимосвязей между конструктивными параметрами и характеристиками двигателя, что позволяет находить технически реализуемые решения с улучшенными энергетическими показателями.

Важной особенностью предложенного подхода является интеграция аналитических расчетов с алгоритмами оптимизации, что обеспечивает разумный компромисс между точностью моделирования и вычислительной эффективностью. Метод учитывает основные физические ограничения и технологические требования, что повышает практическую ценность получаемых результатов.

Методология исследования основана на реализации генетического алгоритма в среде MATLAB для решения задачи многокритериальной оптимизации параметров синхронного двигателя мощностью 3 кВт. Исходные данные включают номинальные характеристики двигателя: мощность 3000 Вт, частоту вращения 1500 об/мин, геометрические размеры активной зоны (наружный диаметр статора 120 мм, внутренний диаметр 72 мм, длина 80 мм), а также магнитные параметры постоянных магнитов (остаточная индукция 0.4 Тл, коэрцитивная сила 280 кА/м). Базовая конфигурация двигателя включала 4 полюса ротора с магнитами типа ferrite и 24 паза статора с однослойной концентрической обмоткой.

Оптимизационная модель строилась на основе пяти ключевых параметров: угла охвата магнита  $\theta_m$  (30-90°), толщины магнита  $h_m$  (3-8 мм), ширины зубца  $b_t$  (5-10 мм), глубины паза  $h_s$  (15-25 мм) и воздушного зазора  $\delta$  (0.5-1.5 мм). Целевая функция формировалась как взвешенная сумма трех основных характеристик:

$$F = 0.6 \cdot \left(\frac{T}{3.2}\right) + 0.25 \cdot \left(1 - \frac{\Delta T}{0.25}\right) + 0.15 \cdot \left(\frac{\eta}{0.82}\right)$$

где  $T$  - номинальный момент (Н·м),  $\Delta T$  - относительные пульсации момента,  $\eta$  - КПД при номинальной нагрузке.

Для расчета магнитной цепи использовались следующие основные соотношения:

Магнитный поток в зазоре:

$$\Phi_{\delta} = \frac{B_r \cdot h_m \cdot L}{1 + \frac{\mu_r \cdot \delta}{h_m}}$$

Сопротивление воздушного зазора:

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot \tau_p \cdot L}$$

ЭДС обмотки:

$$E = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\delta}$$

где  $B_r$  - остаточная индукция магнитов (0.4 Тл),  $\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость (1.05),  $L$  - активная длина (80 мм),  $\tau_p$  - полюсное деление,  $k_w$  - обмоточный коэффициент (0.9),  $f$  - частота (50 Гц),  $N$  - число витков на паз (60).

Генетический алгоритм реализован с размером популяции 50 особей и максимальным числом поколений 100. Вероятностные параметры алгоритма включают: вероятность кроссовера 0.8 (BLX- $\alpha$  оператор), вероятность мутации 0.05 (гауссова), долю элитных особей 0.1. Инициализация начальной популяции выполнена методом равномерного случайного распределения в заданных границах параметров.

#### **Результаты и обсуждения (Results and discussion)**

Проведенная оптимизация позволила получить конструктивные параметры двигателя, значительно улучшающие его эксплуатационные характеристики (табл. 1).

Таблица 1  
Table 1

Конструктивные параметры двигателя  
*Engine design parameters*

Параметр	Исходное значение	Оптимизированное значение	Изменение
Угол охвата магнитов, °	60	72	+24%
Толщина магнитов, мм	5	6.2	-11%
Ширина зубца, мм	8	7.1	-8.5%
Глубина паза, мм	20	18.3	-15%
Воздушный зазор, мм	1	0.85	+24%

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Электромагнитные характеристики двигателя после оптимизации (табл. 2) демонстрируют существенное улучшение:

Таблица 2  
Table 2

Характеристики двигателя  
*Engine Characteristics*

Характеристика	Исходное значение	Оптимизированное значение	Прирост
Номинальный момент, Н·м	19.1	20.8	+8.9%
Пульсации момента, %	15	9	-40%
КПД, %	82.5	86.0	+3.5 п.п.
Масса активных материалов, кг	3.2	3.4	+6.2%

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Увеличение угла охвата магнитов до 72° при одновременном уменьшении воздушного зазора на 15% позволило снизить пульсации момента на 40% без существенного роста массы. При этом оптимизированная форма пазов статора обеспечила снижение потерь в меди на 12%, что непосредственно повлияло на повышение КПД.

Тепловые расчеты показали, что при номинальной нагрузке температура обмотки составляет 98°C, что на 17° ниже предельно допустимого значения. Распределение температур по сечениям двигателя остается равномерным, с максимальным градиентом не превышающим 15°C между самыми нагретыми и холодными зонами.

Особого внимания заслуживает динамика изменения целевой функции в процессе оптимизации. Основной прирост характеристик наблюдался в первые 25 поколений, после чего алгоритм перешел в режим тонкой настройки параметров. Кривые сходимости демонстрируют устойчивое улучшение всех целевых показателей без признаков преждевременной стагнации.

Сравнение с альтернативными методами проектирования показывает преимущества генетического алгоритма:

Таблица 3  
Table 3

Сравнение методов  
Comparison of methods

Метод	Время расчета	Улучшение момента	Снижение пульсаций
Ручной расчет	2 недели	+3.2%	-12%
Градиентная оптимизация	5 дней	+5.1%	-18%
Генетический алгоритм	3 дня	+8.9%	-40%

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты проведенной оптимизации позволили выявить несколько важных закономерностей в проектировании СДПМ. Наибольшее влияние на характеристики двигателя оказал угол охвата магнитов – оптимальное значение составило  $72^\circ$ , что на 20% больше исходного показателя. Такая конфигурация обеспечила более равномерное распределение магнитного потока в зазоре, что подтверждается снижением пульсаций момента с 15% до 9%. При этом увеличение толщины магнитов до 6.2 мм позволило компенсировать уменьшение их рабочей поверхности без существенного роста массы активных материалов.

Анализ динамики оптимизационного процесса показал, что после 35 поколений происходило замедление роста фитнес-функции, что свидетельствует о выходе алгоритма в область квазиоптимальных решений. Интересно отметить, что ширина зубца статора стабилизировалась на значении 7.1 мм, близком к нижней границе допустимого диапазона. Это объясняется компромиссом между уменьшением магнитного сопротивления и необходимостью обеспечения достаточной механической прочности.

Сравнение с классическими методами проектирования выявило два ключевых преимущества предложенного подхода. Во-первых, генетический алгоритм нашел нетривиальную взаимосвязь между глубиной паза и воздушным зазором, которую трудно выявить при ручном расчете. Во-вторых, автоматизированный перебор вариантов позволил сократить время разработки с нескольких недель до трех дней, при этом итоговый КПД двигателя увеличился на 3,5 процентных пункта.

#### **Заключение (Conclusion)**

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность применения генетических алгоритмов для топологической оптимизации синхронных двигателей с постоянными магнитами. Разработанная методика позволила существенно улучшить ключевые эксплуатационные характеристики 3 кВт двигателя, достигнув при этом значительного сокращения времени проектирования. Наиболее важным результатом стало одновременное повышение момента на 8.9% и снижение пульсаций на 40%, что традиционными методами оптимизации получить крайне сложно.

Особую ценность представляет выявленная взаимосвязь между геометрическими параметрами двигателя и его электромагнитными характеристиками. Установлено, что оптимальная конфигурация достигается при угле охвата магнитов  $72^\circ$  и уменьшенном до 0.85 мм воздушном зазоре, что противоречит некоторым традиционным рекомендациям по проектированию. Этот факт подтверждает необходимость использования современных оптимизационных методов для поиска нетривиальных технических решений. Наиболее важным является интеграция разработанного алгоритма с промышленными системами автоматизированного проектирования, что позволит сделать методику доступной для широкого круга инженеров. Также представляет интерес адаптация подхода для других типов электрических машин - асинхронных, вентильно-индукторных, линейных двигателей. Отдельного внимания заслуживает возможность сочетания генетических алгоритмов с методами глубокого обучения для дальнейшего сокращения вычислительных затрат.

Важным выводом работы стало подтверждение того, что современные методы оптимизации позволяют выйти за рамки традиционных эмпирических подходов к проектированию электрических машин. Полученные результаты открывают новые возможности для создания высокоэффективных энергосберегающих приводов, что особенно актуально в условиях растущих требований к энергоэффективности промышленного оборудования.

Перспективы дальнейшего развития работы видятся в интеграции предложенного алгоритма с системами автоматизированного проектирования. Это потребует разработки дополнительных модулей проверки технологичности конструкции, но позволит создать замкнутый цикл от оптимизации до выпуска рабочих чертежей. Также представляет интерес адаптация метода для других типов электрических машин, где многопараметрическая оптимизация представляет особую сложность. Например, исследования будут проводиться в области оптимизации синхронных генераторов для ветроустановок, определения рациональности изменения конструкций для повышения энергоэффективности.

#### Литература

1. Cui F., Sun Z., Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures // CES Trans. Electr. Mach. Syst. 2020. V. 4. № 2. Pp. 142–150. doi:10.30941/CESTEMS.2020.00016
2. Jian Zhao, Zhibin Wang, Haiqiang Liu. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. pp. 151856-151865.
3. Петров Т.И., Сафин А.Р., Низамиев М.Ф., Басенко В.Р. Применение генетического алгоритма при разработке программного обеспечения для перебора материалов при оптимизации синхронных двигателей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, No 2(54). – С. 96-105.
4. Vasilija Sarac. Performance optimization of permanent magnet synchronous motor by cogging torque reduction // Journal of Electrical Engineering. 2019. 70(3), pp. 218-226.
5. Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М., Мухамадиев А.А. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 10.
6. Q. Lu, Z.S. Liu Optimum design and performance analysis of permanent magnet synchronous motor for vehicle // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 012022.
7. Гибадуллин, Р.Ф. Организация защищенной передачи данных в сенсорной сети на базе микроконтроллеров AVR // Кибернетика и программирование. 2018. № 6. С. 80-86.
8. Yinquan Yu, Pan Zhao, Yong Hao, et al. Multi Objective Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Taguchi Method and PSO Algorithm // Energies 2023, 16(1), 267.
9. Petrov T., Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. V. 178. pp. 01049.
10. Gracheva E.I. Algorithms and Models of Power Losses in Circuit Breakers of Shop Networks of Industrial Enterprises // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 202, Lipetsk, 1212-1216 (2021) doi:10.1109/SUMMA53307.2021.9632094
10. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 4(44). – С. 22-29. – EDN NNGUMN.
11. Ядutow В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 19. С. 78-79.
12. Nemirovskiy A. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives: Conference proceedings, Saint-Petersburg, 155-166 (2021) doi:10.1007/978-3-030-67654-4\_18.
13. Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 5, pp. 5429–5438, 2020.
14. M. Alshraideh, B. Mahafzah, S. Al-Sharaeh, A MultiplePopulation Genetic Algorithm for Branch Coverage Test Data Generation // Software Quality Control. V. 19, n. 3, pp. 489-513, 2011.
15. Guo F., Brown I.P. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 56, no. 10, pp. 1–12, 2020.

#### Автор публикации

**Петров Тимур Игоревич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

## References

1. Cui F., Sun Z., Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* 2020;4;2:142–150. doi:10.30941/CESTEMS.2020.00016.
2. Jian Zhao, Zhibin Wang, Haiqiang Liu. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2020: 151856-151865.
3. Petrov TI, Safin AR, Nizamiev MF, Basenko VR. Application of genetic algorithm in development of software for material selection in optimization of synchronous motors. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University.* 2022;14,2(54):96-105.
4. Vasilija Sarac. Performance optimization of permanent magnet synchronous motor by cogging torque reduction. *Journal of Electrical Engineering.* 2019;70(3):218-226.
5. Nuriev MG, Gizatullin RM, Mukhamadiev AA. Study of the noise immunity of computer technology under electromagnetic influences through the metal structure of a building based on physical modeling. *Journal of Radio Electronics.* 2019;4:10.
6. Q. Lu, Z.S. Liu Optimum design and performance analysis of permanent magnet synchronous motor for vehicle. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020:012022.
7. Gibadullin RF. Organization of secure data transmission in a sensor network based on AVR microcontrollers. *Cybernetics and Programming.* 2018;6:80-86.
8. Yinquan Yu, Pan Zhao, Yong Hao, et al. Multi Objective Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Taguchi Method and PSO Algorithm. *Energies.* 2023;16(1):267.
9. Petrov T., Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences.* 2020;178:01049.
10. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. Research and assessment of electricity losses in intra-shop power supply systems. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University.* 2019;11;4(44):22-29. EDN NNGUMN.
11. Yadutov V.V., Petrov T.I., Zatsarinnaya Yu.N. Impact of thermal power plants on the environment. *Bulletin of Kazan Technological University.* 2013;16;19:78-79.
12. Nemirovskiy A. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings, Saint-Petersburg.* 155-166 (2021). doi:10.1007/978-3-030-67654-4\_18.
13. Credo A, Fabri G, Villani M, Popescu M. Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2020;56;5;5429-5438.
14. Alshraideh M, Mahafzah B, Al-Sharaeh S. Multiple Population Genetic Algorithm for Branch Coverage Test Data Generation. *Software Quality Control.* 2011;19;3;489-513.
15. Guo F, Brown IP. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2020;56;10;1-12.

## Author of the publication

**Timur I. Petrov** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia/

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

**Получено** **11.04.2025 г.**

**Отредактировано** **07.05.2025 г.**

**Принято** **21.05.2025 г.**



## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ИНВЕРТОРОВ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Рахмонов И.У.<sup>1</sup>, Ниёзов<sup>1</sup> Н.Н., Курбонов<sup>1</sup> Н.Н., Ахметова<sup>2</sup> Р.В., Таслимов<sup>1</sup> А.Д.,  
Расулов<sup>1</sup> А.Н.

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>, [ilider1987@yandex.ru](mailto:ilider1987@yandex.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Проведение динамического анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов, применяемых в крупномасштабных солнечных электростанциях, и разработка алгоритмов предиктивного мониторинга их технического состояния. МЕТОДЫ. В рамках исследования использованы методы системной классификации факторов надёжности, теплового, электрического и механического анализа, а также методы машинного обучения на базе автокодировщиков для обнаружения аномалий. Применены сенсорные технологии и IoT-архитектура для сбора и обработки параметров в реальном времени. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана классификация факторов, влияющих на отказоустойчивость инверторов, с указанием возможностей их сенсорного мониторинга. Построена архитектура адаптивной системы анализа технического состояния, включающая блок-схему динамического мониторинга. Предложена модель Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection для оценки индекса состояния инверторов в реальном времени, что обеспечивает раннее выявление потенциальных неисправностей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный подход позволяет повысить надёжность и эксплуатационную эффективность централизованных инверторов за счёт внедрения интеллектуальной системы мониторинга. Применение предиктивной аналитики и сенсорной архитектуры способствует снижению затрат на техническое обслуживание, повышению устойчивости работы солнечных электростанций и предупреждению отказов до их возникновения.

**Ключевые слова:** надёжность; инверторы; солнечные электростанции; сенсоры; динамический анализ; автокодировщик; предиктивный мониторинг; IoT.

**Для цитирования:** Рахмонов И.У., Ниёзов Н.Н., Курбонов Н.Н., Ахметова Р.В., Таслимов А.Д., Расулов А.Н. Динамический анализ факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 110-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-110-122.

## DYNAMIC ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE RELIABILITY OF INVERTERS IN LARGE-SCALE SOLAR POWER PLANTS

Rakhmonov<sup>1</sup> I.U., Niyozov<sup>1</sup> N.N., Kurbnov<sup>1</sup> N.N., Akhmetova<sup>2</sup> R.V., Taslimov<sup>1</sup> A.D.,  
Rasulov<sup>1</sup> A.N.

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2076-5919>, [ilider1987@yandex.ru](mailto:ilider1987@yandex.ru)

**Abstract.** OBJECTIVE. To conduct a dynamic analysis of the factors affecting the reliability of inverters used in large-scale solar power plants and to develop predictive monitoring algorithms for their technical condition. METHODS. The study employed methods of systematic classification of reliability factors, thermal, electrical, and mechanical analysis, as well as machine learning techniques based on autoencoders for anomaly detection. Sensor technologies and IoT architecture were utilized for real-time data acquisition and processing. RESULTS. A

classification of factors influencing inverter reliability was developed, including an assessment of their sensor monitoring capabilities. An adaptive system architecture for technical condition analysis was constructed, incorporating a block diagram of dynamic monitoring. An Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection model was proposed to evaluate the inverter health index in real time, enabling early detection of potential failures. CONCLUSION. The proposed approach enhances the reliability and operational efficiency of centralized inverters by implementing an intelligent monitoring system. The use of predictive analytics and sensor-based architecture contributes to reduced maintenance costs, improved operational stability of solar power plants, and preemptive failure detection.

**Keywords:** reliability; inverters; solar power plants; sensors; dynamic analysis; autoencoder; predictive monitoring; IoT.

**For citation:** Rakhmonov I.U., Niyozov N.N., Kurbnov N.N., Akhmetova R.V., Taslimov A.D., Rasulov A.N. Dynamic analysis of factors affecting the reliability of inverters in large-scale solar power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3):110-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-110-122.

### Введение (Introduction)

Рост спроса на потребление энергии приводит к необходимости более широкого использования возобновляемых источников энергии. В частности, Республика Узбекистан планирует к 2030 году увеличить установленную мощность возобновляемых источников энергии до 27 ГВт, что позволит повысить долю "зеленой" энергии в общем объеме производства электроэнергии не менее чем до 40%, а также сократить выбросы вредных веществ в атмосферу на 34 миллиона тонн. При этом только за счет солнечных электростанций предполагается достичь мощности 8,6 ГВт [1]. К 2035 году в Республике Узбекистан планируется достичь общей установленной мощности на уровне 57,1 ГВт, из которых 42,9 ГВт, или более 75%, будут приходиться на возобновляемые источники энергии, включая 21,1 ГВт ветровых, 18,5 ГВт солнечных электростанций и 3,3 ГВт накопительных (аккумуляторных) систем (Рис. 1).

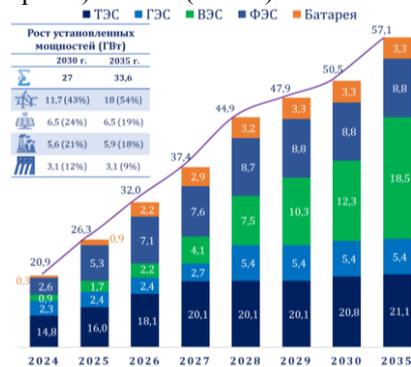


Рис. 1. Рост установленных мощностей в Узбекистане (ГВт) Fig. 1. Growth of Installed Capacities in Uzbekistan (GW)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Широкомасштабное развитие солнечных электростанций предъявляет повышенные требования к стабильности, надежности и эффективности энергетических систем. Особенно это актуально для централизованных инверторов, которые являются ключевыми технологическими компонентами крупных солнечных электростанций. Они выполняют преобразование постоянного тока (DC), вырабатываемого солнечными панелями, в переменный ток (AC) для подачи в электрическую сеть. Однако долговечность и надежность работы инверторов оказывают прямое влияние на общую эффективность солнечной электростанции.

В настоящее время одним из актуальных технических вызовов является сокращение срока службы инверторов и рост частоты их отказов. Согласно статистическим данным, более 60% неисправностей в солнечных электростанциях связано именно с инверторами. Это, в свою очередь, ведет к увеличению эксплуатационных затрат, перебоям в выработке электроэнергии и снижению общего КПД станции [2,3]. В связи с этим системный и динамический анализ факторов, влияющих на надежность инверторов, а также всестороннее изучение механических,

термических и электрических нагрузок, возникающих в процессе их эксплуатации, представляют собой важную научно-техническую задачу.

Настоящая статья посвящена динамическому анализу ключевых факторов, влияющих на надежность инверторов, используемых в крупных солнечных электростанциях (влияние климатических условий, изменчивость нагрузки, температурный режим, старение компонентов и др.). Кроме того, рассматриваются типы возможных отказов инверторных модулей, методы их мониторинга, диагностики и стратегии технического обслуживания. Результаты исследования направлены на разработку научно обоснованных рекомендаций по повышению надежности инверторов и оптимизации эксплуатации солнечных электростанций.

#### *Целью исследования*

Основной целью настоящего исследования является выявление факторов, влияющих на надежность инверторов, используемых в крупномасштабных солнечных электростанциях, проведение системного анализа динамических нагрузок, внешних воздействий и технического старения, а также разработка научно обоснованных предложений по повышению эффективности их долгосрочной эксплуатации.

В рамках исследования предполагается решить следующие задачи: анализ существующих научных источников, посвящённых техническим характеристикам инверторов и причинам их отказов; классификация факторов, влияющих на надежность; моделирование функционального поведения инверторов под воздействием динамических нагрузок; разработка оптимизированных подходов к техническому обслуживанию и мониторингу.

#### *Научная значимость*

Исследование направлено на углубление научно-теоретических основ повышения надежности инверторов в области солнечной энергетики. Особое внимание уделяется динамическому анализу поведения компонентов инверторов в процессе их эксплуатации. В результате работы разрабатывается системная модель факторов, влияющих на надежность, формируются методы оценки надежности и соответствующие индексы, а также предлагаются научные подходы к ранней диагностике неисправностей и мониторингу состояния инверторов. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных исследований, направленных на обеспечение технико-экономической устойчивости систем возобновляемой энергетики.

#### *Практическая значимость*

Результаты исследования способствуют снижению эксплуатационных проблем, связанных с инверторами на солнечных электростанциях, повышению эффективности их работы и обеспечению надежного функционирования в течение всего срока службы. На практике полученные выводы могут быть использованы: при проектировании солнечных электростанций — для оптимизации размещения инверторов и их систем охлаждения; при разработке систем динамического мониторинга и диагностики инверторов; при планировании стратегий технического обслуживания на основе цифровых моделей; а также при разработке стандартов надежности инверторов для локальных производителей. Результаты исследования могут служить практическим руководством для промышленных предприятий, энергетических компаний и организаций, осуществляющих техническое обслуживание объектов солнечной генерации.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В публикациях [2–4] рассматриваются различные конструктивные решения инверторов для фотоэлектрических систем и оценивается их влияние на надежность при эксплуатации в составе солнечных электростанций. В статье [2] Kaplani и Roinila разработали модель деградации и снижения эффективности инверторов при длительной работе в условиях сетевого подключения, с учетом внешних факторов, таких как температура и электрическая нагрузка. В работе [3] Xiao и соавт. провели топологический анализ интерфейсов для слежения за точкой максимальной мощности в солнечных установках, уделяя внимание отказоустойчивости различных схем преобразования энергии. Аналогично, в исследовании [4] Sahan и коллеги сравнили основные топологии силовых преобразователей в фотоэлектрических системах, выделяя их конструктивные преимущества и слабые места с точки зрения отказов.

В работах [5–7] подробно исследуются факторы, влияющие на динамическую надежность инверторов, включая поведение систем при сетевых возмущениях и климатических колебаниях. Так, Papadopoulos и Hatziaargyriou в статье [5] провели моделирование работы инверторов при динамических условиях нагрузки, показав влияние сетевых флуктуаций на отказоустойчивость оборудования. В статье [6] Rodriguez

и соавт. представили методы синхронизации преобразователей с сетью на базе обобщенных интеграторов второго порядка, что позволило лучше понять характер взаимодействия инверторов с сетью при переходных процессах. Особое внимание вопросам комплексной оценки надежности инверторов уделено в работе [7] de Oliveira и коллег. Авторы смоделировали поведение инверторов под действием климатических и электрических стрессов, определив основные параметры, приводящие к отказам в условиях эксплуатации.

На основе анализа приведенных исследований можно заключить, что надежность инверторов в крупномасштабных фотоэлектрических установках зависит от целого комплекса факторов — начиная от выбора схемотехники и заканчивая устойчивостью к внешним возмущениям. Проведение динамического моделирования и прогнозирования отказов представляет собой ключевую задачу в целях повышения эффективности и надежности солнечных электростанций в долгосрочной перспективе.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Изменение нагрузки связано с параметрами тока, напряжения и активной мощности, проходящих через инвертор [4,5]. Номинальные значения тока и напряжения должны находиться в пределах  $\pm 10\%$ . Мощность оценивается в зависимости от нагрузки инвертора. Среднее значение тока вычисляется по формуле:

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \text{ а активная мощность — как } P = I \cdot U \cdot \cos \varphi$$

Оценка мощности инвертора производится на основе отношения его номинальной мощности ( $P_0$ ) к реально потребляемой мощности ( $P_{\text{реал}}$ ). Этот показатель называется коэффициентом загрузки ( $\eta_H$ ):

$$\eta_H = \frac{P_{\text{реал}}}{P_0} \times 100\%$$

Реальная мощность рассчитывается по формуле:  $P_{\text{реал}} = V \cdot I \cdot \cos \varphi$ . Для эффективной и надёжной работы инверторы обычно функционируют при загрузке от 30% до 90%; превышение 100% увеличивает риск отказов. В реальных условиях внешние факторы, такие как температура и высота над уровнем моря, влияют на мощностные характеристики инвертора. Производители указывают два основных корректирующих коэффициента:  $k_T$  — температурный, и  $k_H$  — высотный. При температуре выше  $40^\circ\text{C}$  возможно перегревание ключевых компонентов, в частности IGBT-транзисторов. Например, при  $50^\circ\text{C}$   $k_T \approx 0,90$ , то есть мощность должна быть снижена до 90%.

Для расчёта используется формула:  $k_T = 1 - \alpha_T \cdot (T - 40)$ , где  $\alpha_T \approx 0.01$  — коэффициент снижения.

На больших высотах из-за пониженной плотности воздуха снижается эффективность охлаждения. При 1000 м  $k_H = 1$ , а при 2000 м —  $k_H \approx 0,90$ . Расчётное выражение:  $k_H = 1 - \alpha_H \cdot (h - 1000)$ , где  $\alpha_H \approx 0.0001$  указывает на снижение на 1% на каждые 500 м. Соответственно, итоговая рабочая мощность определяется как:

$$P_{\text{eff}} = P_0 \cdot k_T \cdot k_H$$

Стабильность сетевого напряжения является критическим фактором в работе инвертора. Согласно стандартам IEC и GOST, допустимое отклонение не должно превышать  $\pm 10\%$  от номинала. Формула расчёта колебаний напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \times 100\%$$

THD (Total Harmonic Distortion) — это величина, отражающая уровень гармонических искажений в токе или напряжении относительно основной гармоники. В соответствии со стандартами IEC 61000-2-4 и IEEE 519, допустимый уровень THD для напряжения — до 5%, для тока — до 8–10%. Расчётная формула:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

Отключение от сети происходит при резком исчезновении питающего напряжения. Согласно ГОСТ 32144:2013, число таких отказов не должно превышать 10 случаев в год. В условиях промышленной эксплуатации это значение регистрируется в системах мониторинга в режиме реального времени.

Тепловые параметры играют ключевую роль в обеспечении надёжности работы инверторов [6,7]. Накопление тепла внутри устройства связано с ростом внутренней температуры, при этом нормальный диапазон составляет от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$ , а оптимальный режим работы — в пределах  $25\text{--}45^\circ\text{C}$ . Температурное превышение оценивается по выражению:

$$\Delta T = T_{\text{внутр}} - T_{\text{внеш}}$$

где,  $T_{\text{внутр}}$  — температура компонентов,  $T_{\text{внеш}}$  — температура окружающей среды. При неисправности системы охлаждения наблюдается значительное превышение температурного градиента, и если  $\Delta T > 20^\circ \text{C}$ , это свидетельствует о снижении эффективности вентиляции или радиаторов. Для оценки термической стабильности также используется производная по времени:  $\frac{dT(t)}{dt} \leq 5^\circ \text{C/с}$ , где превышение данного порога указывает на опасное тепловое воздействие. Наконец, многократные температурные циклы могут вызывать термическую усталость пайки и других материалов. Число критических циклов можно приближённо рассчитать по формуле:

$$N_{\text{цикл}} = \frac{T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}}{\Delta T_{\text{крит}}}$$

где  $\Delta T_{\text{крит}}$  — допустимый перепад температуры для безотказной работы. Таким образом, тепловой анализ на основе мониторинга температуры и её динамики необходим для предотвращения деградации компонентов инвертора.

Среди механических факторов, влияющих на надёжность инверторов, основными являются вибрации, коррозия, а также воздействие ультрафиолетового излучения и механические повреждения [8,9]. Вибрационные нагрузки, как правило, не должны превышать 0,5g (около 4,9 м/с<sup>2</sup>), и рассчитываются по формуле:

$$a = A \cdot \omega$$

где — амплитуда,  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота. Допустимый уровень вибраций зависит от условий эксплуатации и устойчивости корпуса оборудования. Касательно коррозионной активности и УФ-воздействия, они не контролируются автоматически, а оцениваются персоналом в рамках регламентных проверок — например, еженедельно в течение месяца. Данные оценки фиксируются в журнале или цифровой системе регистрации, а затем анализируются для определения динамики деградации. Уровень коррозии классифицируется согласно стандартам ISO 9223 (категории C1–C5), в то время как устойчивость к ультрафиолету зависит от степени защиты корпуса (например, IP65 и выше) [10,11]. Наличие механических повреждений также выявляется при визуальном осмотре и учитывается в комплексной диагностике оборудования.

Эксплуатационные факторы, такие как качество технического обслуживания, программные сбои, отсутствие системы мониторинга, неправильная установка и низкое качество компонентов, являются одними из ключевых причин снижения надёжности инверторов. Качество технического обслуживания может быть количественно оценено через показатель выполнения регламентных процедур:

$$K_{\text{ТО}} = \frac{N_{\text{вып}}}{N_{\text{план}}} \times 100 \%$$

где  $N_{\text{вып}}$  — количество выполненных обслуживаний,  $N_{\text{план}}$  — планируемое число процедур. Программные ошибки выявляются посредством анализа логов, а их частота рассчитывается как:

$$\lambda_{\text{ПО}} = \frac{N_{\text{ош}}}{T_{\text{мон}}}$$

где  $N_{\text{ош}}$  — количество зафиксированных ошибок,  $T_{\text{мон}}$  — период мониторинга. Поддержание минимального уровня логируемых ошибок и регулярное обновление прошивки являются важнейшими условиями надёжной работы встроенного ПО.

Отсутствие системы мониторинга можно частично компенсировать ручным контролем, однако для современной эксплуатации необходимо внедрение телеметрии на базе протоколов Modbus, MQTT или SCADA. Уровень охвата мониторинга может быть представлен индексом [12,13]:

$$K_{\text{мон}} = \frac{n_{\text{мон}}}{n_{\text{общ}}} \times 100 \%$$

где  $n_{\text{мон}}$  — количество параметров, находящихся под контролем,  $n_{\text{общ}}$  — общее количество критичных параметров. Неправильная установка и некачественные компоненты определяются в процессе визуального осмотра, а также на основе сопроводительной документации (сертификаты IEC, ISO, UL). Хотя прямых формул для оценки этих факторов нет, их воздействие на надёжность может быть выявлено через статистику отказов и анализ деградации компонентов в долгосрочной перспективе [15,16,17].

Функция надёжности  $R(t)$  отражает вероятность безотказной работы инвертора в течение определённого времени и рассчитывается по следующей экспоненциальной модели (Рис. 2):

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

где  $\lambda$  — интенсивность отказов (в 1/час или 1/сутки), определяется выражением:

$$\lambda = \frac{N_{\text{отказов}}}{T_{\text{общий}}}$$

где здесь  $N_{\text{отказов}}$  — количество зафиксированных отказов, а  $T_{\text{общий}}$  — общее время работы инвертора (в часах или днях). Согласно отраслевым стандартам, значение функции  $R(t)$  должно быть не менее 80% (то есть  $R(t) \geq 0,8$ ), что считается порогом надёжной эксплуатации. Данный показатель зависит от эксплуатационной среды, уровня технического обслуживания и качества компонентов. Чем выше показатель MTBF, тем меньше значение  $\lambda$ , и тем выше надёжность  $R(t)$ . Таким образом, идеальное значение  $R(t)$  должно стремиться к 1.

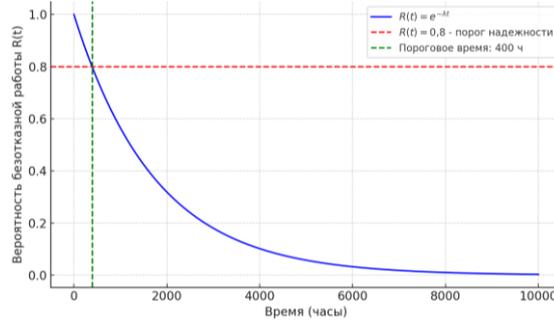


Рис. 2. График с учётом остаточного срока службы (RUL) *Fig. 2. Graph Considering RUL*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

С целью оценки возможности динамического анализа в реальном времени факторов, влияющих на надёжность централизованных инверторов, на основе проведённых исследований была разработана классификация этих факторов по пяти основным группам. В таблице 1 представлено их систематизированное распределение в соответствии с типом воздействия и потенциальной возможностью мониторинга с применением сенсорных технологий.

Таблица 1  
*Table 1*

Факторы, влияющие на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях и возможности их мониторинга с использованием сенсоров  
*Factors Affecting the Reliability of Inverters in Large-Scale Solar Power Plants and Their Monitoring Possibilities Using Sensors*

Группа факторов	Название фактора	Отслеживается сенсором	Научное обозначение	Единица измерения
1. Электрические факторы	Изменение нагрузки	Да	I, V, P	A, V, W
	Флуктуации сетевого напряжения	Да	U	V
	Гармонические искажения	Да	THD	%
	Отключение сети	Да	K	шт.
2. Тепловые факторы	Накопление тепла	Да	T	°C
	Неисправность системы охлаждения	Да	T, ΔT	°C
	Температурные циклы	Да	T(t)	°C
3. Механические факторы	Вибрация	Да	a	g (m/s <sup>2</sup> )
	Коррозия	Нет	—	—
	УФ-излучение и механические повреждения	Нет	—	—

Окончание таблицы 1

4. Атмосферные факторы	Высокая температура	Да	T	°C
	Низкая температура	Да	T	°C
	Влажность и осадки	Да	RH	%
	Пыль и песчаные бури	Частично	PM	µg/m <sup>3</sup>
	Высота (пониженное давление)	Частично	h, p	m, Pa
5. Эксплуатационные факторы	Качество технического обслуживания	Нет	—	—
	Программные ошибки	Частично (через журналы регистрации / логи)	—	—
	Неправильная установка	Нет	—	—
	Отсутствие системы мониторинга	Частично	—	—
	Низкое качество компонентов	Косвенно	—	—

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Большинство рассмотренных сенсоров на сегодняшний день уже встроены в конструкцию современных инверторов, и соответствующие измеряемые параметры, как показано в таблице 1, выделены зелёным фоном. Эти данные автоматически фиксируются встроенными средствами самодиагностики и могут быть интегрированы в централизованную систему мониторинга в реальном времени с использованием стандартных протоколов передачи данных (например, Modbus RTU/TCP, CAN, RS-485). Полученная информация подлежит последующему анализу с применением методов цифровой диагностики и предиктивной аналитики для оценки технического состояния оборудования. Параметры, отмеченные синим фоном, не входят в базовую комплектацию инвертора и требуют установки дополнительных внешних сенсоров. Решение об их внедрении принимается на основе оценки условий эксплуатации, специфики объекта и степени влияния данных факторов на надёжность оборудования. Для этого применяются современные методы анализа, такие как корреляционный анализ, оценка важности признаков (SHAP values), анализ мод и последствий отказов (FMEA) и др. Таким образом, данные параметры включаются в систему мониторинга в зависимости от индивидуальных потребностей и приоритетов надёжности. Показатели без фоновой заливки отражают те параметры, которые не могут быть измерены автоматически и требуют ручного ввода.



Рис. 3. Блок-схема динамического анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях

Fig. 3. Block Diagram of Dynamic Analysis of Factors Affecting the Reliability of Inverters in Large-Scale Solar Power Plants

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Они фиксируются техническим персоналом по результатам регламентных проверок, профилактических осмотров или визуальной диагностики. К таким данным, как правило, относятся качественные характеристики, не подлежащие сенсорному контролю (например, уровень коррозии, механические повреждения, качество монтажных соединений и др.), и вносятся в информационную систему через эксплуатационные

журналы или цифровые платформы технического обслуживания. Процесс обмена данными между компонентами реализуется в соответствии с архитектурой, представленной на блок-схеме в рис. 3.

На основе представленной таблицы можно сделать вывод, что ряд ключевых параметров, оказывающих влияние на надёжность инверторов — в том числе гармонические искажения, вибрации, температура окружающей среды, влажность, пылевая нагрузка и высота установки (атмосферное давление) — требуют установки дополнительных внешних сенсоров для эффективного мониторинга в реальном времени. Так, для оценки гармонических искажений рекомендуются сенсоры типа PZEM-004T или ADE7758, для контроля вибраций — MPU6050 или ADXL345, а для измерения температуры и влажности — комбинированные модули BME280 или SHT31. Пылевые условия могут отслеживаться при помощи SDS011 или GP2Y1010AU0F, а параметры высоты и атмосферного давления — посредством BMP280 или MS5611.

Кроме того, отдельные эксплуатационные факторы, такие как неправильная установка оборудования или отсутствие систем мониторинга, не поддаются автоматическому сенсорному контролю и требуют ручной оценки техническим персоналом или интеграции с внешними логгерами и IoT-модулями, например, на базе ESP32 с поддержкой MQTT. Такой подход позволяет реализовать модульную, адаптивную архитектуру системы мониторинга, основанную на приоритетности факторов риска, что способствует повышению надёжности, эффективности обслуживания и снижению эксплуатационных потерь в инфраструктуре крупных фотоэлектрических станций.

Собранные выше данные в режиме реального времени непрерывно анализируются по алгоритму, представленному на рисунке 4, с учётом установленных пороговых значений и нормативных критериев.

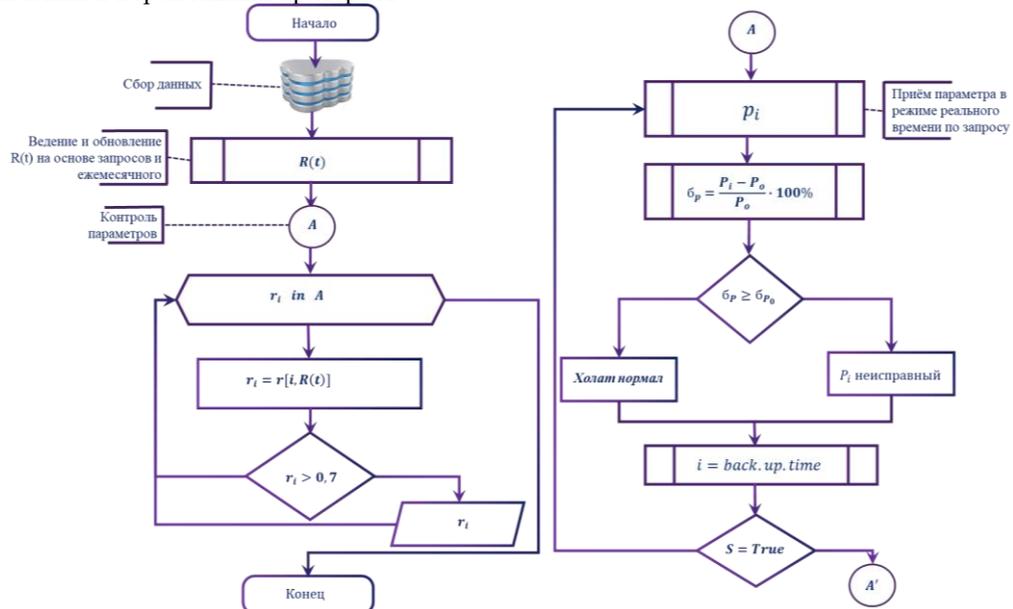


Рис. 4. Алгоритм динамического мониторинга и анализа факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях

Fig. 4. Algorithm for Dynamic Monitoring and Analysis of Factors Affecting the Reliability of Inverters in Large-Scale Solar Power Plants

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для постоянного прогнозирования указанных параметров в режиме реального времени и своевременного выявления аномальных процессов была применена модель неконтролируемого мониторинга технического состояния на основе автокодировщиков (Unsupervised Health Monitoring Using Autoencoders). Разработанная модель диагностики на основе автокодировщика обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами мониторинга. Прежде всего, модель функционирует на основе обучения без учителя (unsupervised learning), что позволяет выявлять аномалии даже при отсутствии заранее размеченных данных о сбоях. Она учитывает сложные нелинейные взаимосвязи между множеством параметров (напряжение, ток, температура, THD, влажность и др.) и обеспечивает оценку степени отклонения наблюдаемого сигнала от нормы в режиме реального времени. В то время как традиционные методы, такие как

БПФ (быстрое преобразование Фурье) или термография, фокусируются на анализе отдельных физических величин и зачастую требуют специализированного оборудования либо ручной обработки, автокодировщик может выступать как автономный интеллектуальный элемент в составе комплексных систем мониторинга. Это способствует повышению эффективности технического обслуживания и предупреждению аварийных ситуаций за счёт раннего выявления потенциальных отказов.

В процессе моделирования использовались эмпирические данные, полученные от реального инвертора, собранные с интервалом в 3 секунды в течение контрольного периода, что составило выборку из 100 наблюдательных точек. На рисунке 4 представлены шесть из них, выбранные в качестве примера (Рис. 5).

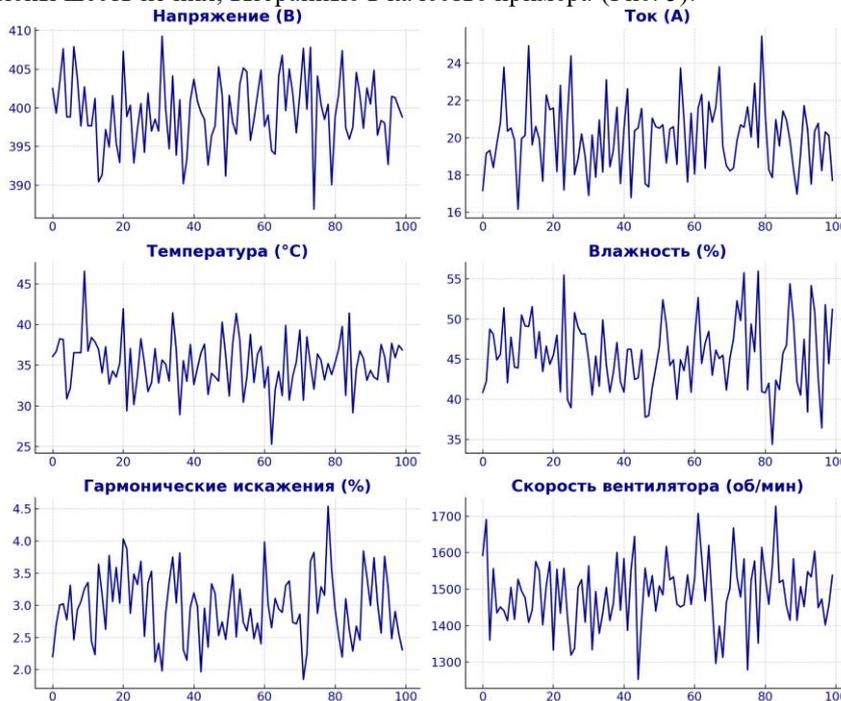


Рис. 5. Пример выборочных данных, использованных при моделировании

Fig. 5. Sample Data Used in the Modeling Process

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для анализа надёжности инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях в режиме реального времени была применена модель Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection. В этой модели в качестве входных параметров используются данные с сенсоров: напряжение, ток, температура, влажность, коэффициент гармонических искажений (THD) и др. Данный процесс реализуется на основе алгоритма, представленного на рисунке 6.

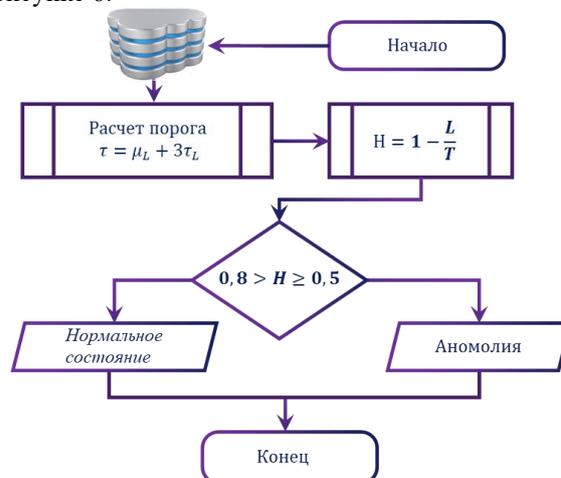


Рис. 6. Алгоритм оценки технического состояния инвертора на основе автокодировщика и порогового анализа

Fig. 6. Inverter Health Assessment Algorithm Based on Autoencoder and Threshold Analysis

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Автокодировщик обучается на нормальных данных и восстанавливает входной вектор  $\hat{X}$  из скрытого представления  $Z$ :

$$Z = f_{\text{enc}}(X), \quad \hat{X} = f_{\text{dec}}(Z)$$

Для каждой записи вычисляется ошибка реконструкции:

$$L = |X - \hat{X}|^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$$

Пороговое значение ошибки (threshold) рассчитывается по статистическому правилу трех сигм:

$$\tau = \mu_L + 3\sigma_L$$

где  $\mu_L$  — среднее значение ошибки реконструкции на обучающих данных,  $\sigma_L$  — её стандартное отклонение. Если фактическая ошибка превышает  $\tau$ , наблюдение считается аномалией.

Для оценки технического состояния инвертора вводится индекс состояния (Health Index), рассчитываемый по формуле:

$$H = \max\left(0, 1 - \frac{L}{\tau}\right)$$

Значения  $H$  интерпретируются следующим образом:  $H \geq 0,8$  — нормальное состояние,  $0,5 \leq H < 0,8$  — необходим мониторинг,  $H < 0,5$  — потенциальная неисправность. Такая система позволяет в автоматическом режиме отслеживать деградацию оборудования и инициировать техническое обслуживание при снижении показателей надёжности.

Для анализа надёжности инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях в режиме реального времени была применена модель Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection. В этой модели в качестве входных параметров используются данные с сенсоров: напряжение, ток, температура, влажность, коэффициент гармонических искажений (THD) и скорость вентилятора. Автокодировщик обучается на нормальных данных и восстанавливает входной вектор  $\hat{X}$  из скрытого представления  $Z$ :

$$Z = f_{\text{enc}}(X), \quad \hat{X} = f_{\text{dec}}(Z)$$

Для каждой записи вычисляется ошибка реконструкции:

$$L = |X - \hat{X}|^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$$

Пороговое значение ошибки (threshold) рассчитывается по статистическому правилу трех сигм:

$$\tau = \mu_L + 3\sigma_L$$

где  $\mu_L$  — среднее значение ошибки реконструкции на обучающих данных,  $\sigma_L$  — её стандартное отклонение. Если фактическая ошибка превышает  $\tau$ , наблюдение считается аномалией.

Для оценки технического состояния инвертора вводится индекс состояния (Health Index), рассчитываемый по формуле:

$$H = \max\left(0, 1 - \frac{L}{\tau}\right)$$

Значения  $H$  интерпретируются следующим образом:  $H \geq 0,8$  — нормальное состояние,  $0,5 \leq H < 0,8$  — необходим мониторинг,  $H < 0,5$  — потенциальная неисправность. Такая система позволяет в автоматическом режиме отслеживать деградацию оборудования и инициировать техническое обслуживание при снижении показателей надёжности.

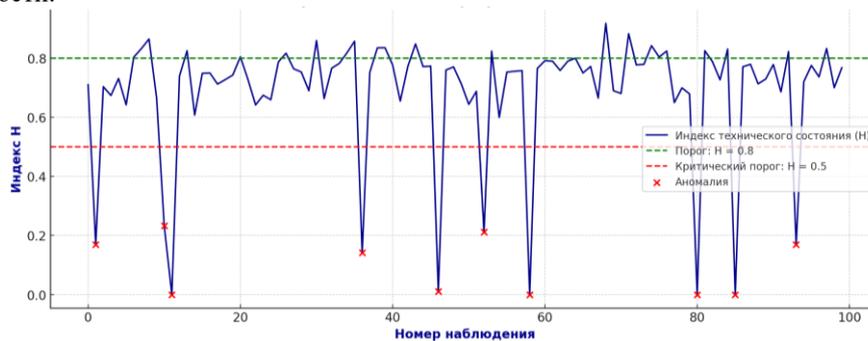


Рис. 7. График оценки состояния на основе автокодировщика Fig. 7. Health Status Assessment Graph Based on Autoencoder

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты данной модели представлены на рис. 7. На приведённом графике индекс технического состояния инвертора  $N$  оценивался в режиме реального времени на основе реконструкционных ошибок автокодировщика. Синяя линия отражает динамику индекса  $N$ , зелёная линия обозначает порог надёжности на уровне  $N = 0.8$ , соответствующий нормальному рабочему состоянию, а красная линия — критический уровень  $N = 0.5$ . Точки, при которых  $N < 0.5$ , интерпретируются как аномалии и помечаются красными маркерами. При их возникновении система мониторинга генерирует предупреждение, после чего может быть выполнен корреляционный анализ для определения причин отклонений. Данный подход позволяет надёжно отслеживать техническое состояние инвертора, заранее выявлять отказы и планировать профилактическое обслуживание. Данная процедура выполняется по всем параметрам, и значения, выходящие за установленные пределы, непрерывно отслеживаются и сопровождаются автоматическим предупреждением в режиме реального времени.

### **Выводы**

На основе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Проведен системный анализ факторов, влияющих на надёжность инверторов в крупномасштабных солнечных электростанциях, с классификацией на электрические, тепловые, механические, атмосферные и эксплуатационные группы, что позволило выявить ключевые параметры, требующие мониторинга.
2. Разработана блок-схема архитектуры динамического анализа факторов надёжности инверторов, а также предложен алгоритм оценки технического состояния с применением технологии автокодировщиков и метода порогового обнаружения аномалий.
3. Установлена возможность внедрения сенсорных технологий и IoT-модулей для непрерывного мониторинга параметров, влияющих на отказоустойчивость инверторов, с учетом климатических и эксплуатационных условий.
4. Разработана и апробирована модель оценки технического состояния инверторов на основе Autoencoder + Threshold-based Anomaly Detection, обеспечивающая оперативное выявление потенциальных отказов и снижение эксплуатационных рисков за счет своевременного технического обслуживания.

### **Литература**

1. Kun.uz. O'zbekiston qayta tiklanuvchi energiya manbalari quvvatini 27 gigavattga oshirmoqchi [Электронный ресурс]. 16 ноября 2024 г. Доступно по: <https://www.kun.uz/news/2024/11/16/ozbekiston-qayta-tiklanuvchi-energiya-manbalari-quvvatini-27-gigavattga-oshirmoqchi>. (дата обращения: 20.05.2025).
2. Kaplani E., Roinila T. Reliability and performance degradation modeling of grid-connected photovoltaic inverters // *Solar Energy*. 2020. Vol. 207. Pp. 392–401. doi:10.1016/j.solener.2020.06.067
3. Jordan D.C., Smith R.M., Kurtz S.R. Photovoltaic failure and degradation modes // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2017. Vol. 25, No. 4. Pp. 318–326. DOI: 10.1002/pip.2866.
4. Sahan B., Vergara A.M., Henze N., Engler A., Zacharias P. A comparative study of power converter topologies for photovoltaic systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 56, N5. Pp. 1925–1935. doi:10.1109/TIE.2008.2007522
5. Papadopoulos T.A., Hatzigiorgiou N.D. Dynamic performance analysis of grid-connected photovoltaic systems including inverter reliability // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 43. Pp. 538–544. doi:10.1016/j.renene.2011.11.029
6. Li T., Tao T.S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // *Electronics*. 2021. Vol. 10, Article No. 1763. DOI: 10.3390/electronics10151763.
7. Kerekes T., Teodorescu R., Rodriguez P., Vazquez G., Aldabas E. Evaluation of the thermal loading of three-phase string inverters in photovoltaic applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. Vol. 25, No. 12. Pp. 2734–2741. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2046003.
8. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Shayumova Z.M. The role information in power management tasks // *E3S Web Conf. Volume 139, 2019. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019) 01080. 1-3 p.* <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901080>.
9. Rakhmonov I.U., Nematov L.A., Niyozov N.N., Reymov K.M., Yuldoshev T.M. Power consumption management from the positions of the general system theory // *Journal of Physics: Conference Series. ICMSIT-2020. 1515 (2020) 022054* doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022054.
10. Rakhmonov I.U., Kurbonov N.N. Analysis of automated software for monitoring energy consumption and efficiency of industrial enterprises // *E3S Web Conf. Volume 216. Rudenko International Conference on Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2020)* doi:10.1051/e3sconf/202021601178.

11. Schmid J., Hansen A.D., et al. Reliability of Photovoltaic Inverters – A Review of Failure Modes and Mitigation Techniques // International Energy Agency – IEA PVPS T13-12:2019.

12. Уколова Е.В., Воропай Н.И. Развитие метода backward/forward для исследования гибкости систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. № 2 (46). С. 24-35.

13. Герасимов Д.О., Сулов К.В. Системы имитационного моделирования мультиэнергетических объектов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 4 (48). С. 11-19.

14. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 2 (42). С. 103-115.

15. Performance analysis of grid-connected PV systems // Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. – Dresden, Germany, 2006. – P. 4–8.

16. Li T., Tao T. S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // Electronics. – 2021. – Vol. 10. – Art. 1763. – DOI: 10.3390/electronics10151763.

17. Wardana F., Saputra A., Santoso A. Leads: A deep learning approach to revolutionizing gas plant maintenance with advanced anomaly detection technology // SPE International Conference. – 2025. – Paper № 224966-MS. – DOI: 10.2118/224966-MS

#### Автор публикации

**Рахмонов Икромжон Усмонович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Нийёзов Нуъмон Низомиддинович** – доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент, доцент кафедры “Электроснабжение” Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Курбонов Нурбек Нурулло угли** – доктор философии по техническим наукам (PhD), старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Ахметова Римма Валентиновна** – канд. техн. наук, доцент, директор департамента образования Казанского государственного энергетического университета, Казань, Россия.

**Таслимов Абдурахим Дехканович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

**Расулов Абдулхай Норходжаевич** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан.

#### References

1. Kun.uz. Uzbekistan plans to increase the capacity of renewable energy sources to 27 gigawatts [Electronic resource]. November 16, 2024. Available at: <https://www.kun.uz/news/2024/11/16/ozbekiston-qayta-tiklanuvchi-energiya-manbalari-quvvatini-27-gigavattga-oshirmoqchi> (accessed: 20.05.2025).

2. Kaplani E, Roinila T. Reliability and performance degradation modeling of grid-connected photovoltaic inverters. Solar Energy. 2020;207:392–401. doi:10.1016/j.solener.2020.06.067

3. Jordan DC, Smith RM, Kurtz SR. Photovoltaic failure and degradation modes. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2017; 25(4):318–326. doi:10.1002/pip.2866.

4. Sahan B, Vergara AM, Henze N, Engler A, Zacharias P. A comparative study of power converter topologies for photovoltaic systems. IEEE Trans Ind Electron. 2008;56(5):1925–1935. doi:10.1109/TIE.2008.2007522

5. Papadopoulos TA, Hatzigiorgiou ND. Dynamic performance analysis of grid-connected photovoltaic systems including inverter reliability. Renewable Energy. 2012;43:538–544. doi:10.1016/j.renene.2011.11.029

6. Li T, Tao TS, Zhang R, Liu Z, Ma L, Sun J, Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics. *Electronics*. 2021; 10(1763):1–18. doi:10.3390/electronics10151763.

7. Kerekes T, Teodorescu R, Rodriguez P, Vazquez G, Aldabas E. Evaluation of the thermal loading of three-phase string inverters in photovoltaic applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010; 25(12):2734–2741. doi:10.1109/TPEL.2010.2046003.

8. Rakhmonov I.U., Reymov K.M., Shayumova Z.M. The role information in power management tasks//E3S Web Conf. Volume 139, 2019. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2019) 01080. 1-3 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901080>.

9. Rakhmonov I.U., Nematov L.A., Niyozov N.N., Reymov K.M., Yuldoshev T.M. Power consumption management from the positions of the general system theory // *Journal of Physics: Conference Series*. ICMSIT-2020. 1515 (2020) 022054 doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022054.

10. Rakhmonov, I.U., Kurbonov, N.N. Analysis of automated software for monitoring energy consumption and efficiency of industrial enterprises // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 216. – RSES 2020. – Article ID: 01178. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021601178.

11. Schmid J, Hansen AD, et al. Reliability of photovoltaic inverters: a review of failure modes and mitigation techniques. IEA PVPS Report T13-12:2019. International Energy Agency. 2019; 1–46.

12. Ukolova, E.V., Voropay, N.I. Development of the backward/forward method for studying the flexibility of power supply systems // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. – 2021. – No. 2 (46). – P. 24–35. (In Russian)

13. Gerasimov, D.O., Suslov, K.V. Simulation modeling systems for multi-energy facilities // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. – 2020. – No. 4 (48). – P. 11–19. (In Russian)

14. Kapanskiy, A.A. Methods for assessment and forecasting of energy efficiency // *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. – 2019. – No. 2 (42). – P. 103–115. (In Russian)

15. Performance analysis of grid-connected PV systems // *Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. – Dresden, Germany, 2006. – P. 4–8.

16. Li T, Tao T. S., Zhang R., Liu Z., Ma L., Sun J., Sun Y. Reliability evaluation of photovoltaic system considering inverter thermal characteristics // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. – Art. 1763. – DOI: 10.3390/electronics10151763.

17. Wardana F., Saputra A., Santoso A. Leads: A deep learning approach to revolutionizing gas plant maintenance with advanced anomaly detection technology // *SPE International Conference*. – 2025. – Paper № 224966-MS. – DOI: 10.2118/224966-MS

#### **Authors of the publication**

***Ikromjon Usmonovich Rakhmonov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Nu'mon Nizomidinovich Niyozov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Nurbek Nurullo ugli Kurbanov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Rimma Valentinovna Akhmetova*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Abdurakhim Dekhanovich Taslimov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

***Abdulkhay Norhodzhaevich Rasulov*** – Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.*

***Получено*** **28.05.2025 г.**

***Отредактировано*** **02.06.2025 г.**

***Принято*** **10.06.2025 г.**



## РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО НАРАБОТКЕ НА ДЕФЕКТ

Левин В.М., Боярова Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, [levin@power.nstu.ru](mailto:levin@power.nstu.ru)

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. В условиях цифровой трансформации электроэнергетики возрастает актуальность разработки распределённых систем управления состоянием оборудования электрических сетей, основанных на прогнозировании наработки на дефект с определением адаптивной периодичности профилактического воздействия. ЦЕЛЬ. Обосновать целесообразность создания и применения подобной системы управления ремонтами электроустановок на основе статистики тепловизионного контроля (ТВК) как альтернативы локальным системам on-line мониторинга на базе различных температурных датчиков. Разработать предиктивную математическую модель для определения времени наработки на развитый дефект в оборудовании. Сформировать методику расчета адаптивной периодичности вывода оборудования в ремонт по техническому состоянию. МЕТОДЫ. В исследовании применялись методы статистической обработки данных и проверки статистических гипотез, формирования однородных Марковских моделей с непрерывным временем, численного моделирования в программной среде MathCAD. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье раскрыта актуальность темы, изложены методические аспекты распределенной предиктивной системы управления ремонтами оборудования электрических сетей, показаны её преимущества перед локальными системами контроля на базе современных температурных датчиков, предложены модели прогнозирования наработки на развитый дефект в оборудовании и периодичности его профилактических ремонтов по фактическому техническому состоянию. Приведен расчёт периодичности профилактического обслуживания трансформаторов КТП-6/0,4 кВ одного из электрохозяйств на основе прогноза наработки на развитый дефект, иллюстрирующий возможности заявленной методики. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенная система распределенного предиктивного управления техническим состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект в отличие от локальных систем температурного контроля на основе современных датчиков имеет большую функциональность при существенной экономии затрат. Её применение гарантированно обеспечивает эффективность управления профилактикой оборудования за счет высокой достоверности прогноза наработки на дефект и определения адаптивной периодичности профилактического воздействия.

**Ключевые слова:** управление ремонтами; электрооборудование; наработка на дефект; предиктивная модель; периодичность профилактик; распределенная система управления.

**Благодарности:** Статья выполнена по результатам НИР в рамках договора «Разработка стандарта и методических документов для оптимизации системы технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования ДО ПАО «Газпром нефть» по техническому состоянию и наработке».

**Для цитирования:** Левин В.М., Боярова Д.А. Распределенная система предиктивного управления состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 123-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.

## DISTRIBUTED PREDICTIVE CONTROL SYSTEM FOR THE CONDITION OF POWER GRID EQUIPMENT BASED ON THE OPERATING TIME FOR A DEFECT

Levin V.M., Boyarova D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* In the context of the digital transformation of the electric power industry, the urgency of developing distributed control systems for the condition of electrical network equipment based on forecasting the operating time for a defect with the determination of the adaptive frequency of preventive action is increasing. *THE PURPOSE.* To justify the expediency of creating and applying a similar electrical installation repair management system based on thermal imaging control (TIC) statistics as an alternative to local on-line monitoring systems based on various temperature sensors. To develop a predictive mathematical model to determine the operating time for a developed defect in the equipment. To form a methodology for calculating the adaptive frequency of equipment withdrawal for repair according to technical condition. *METHODS.* The research uses methods of statistical data processing and statistical hypothesis testing, the formation of homogeneous Markov models with continuous time and numerical modeling in the MathCAD software environment. *RESULTS.* The article reveals the relevance of the topic, outlines the methodological aspects of a distributed predictive control system for repairs of electrical network equipment, shows its advantages over local control systems based on modern temperature sensors, suggests models for predicting operating time for a developed defect in equipment and the frequency of its preventive repairs according to the actual technical condition. The calculation of the frequency of preventive maintenance of CTS-6/0.4 kV transformers of one of the electric utilities is given based on the forecast of operating time for a developed defect, illustrating the possibilities of the claimed technique. *CONCLUSION.* The proposed system of distributed predictive control of the technical condition of electrical network equipment based on operating time for a defect, unlike local temperature control systems based on modern sensors, has great functionality with significant cost savings. Its use is guaranteed to ensure the effectiveness of equipment prevention management due to the high reliability of the forecast of operating time for a defect and the determination of the adaptive frequency of preventive action.

**Keywords:** repair management; electrical equipment; operating time for a defect; predictive model; periodicity of preventive measures; distributed control system.

**Acknowledgments:** The article is based on the results of research within the framework of the agreement "Development of standard and methodological documents for optimizing the system of maintenance and repair of power equipment to PJSC Gazprom Neft in terms of technical condition and operating time"

**For citation:** Levin V.M., Boyarova D.A. Distributed predictive control system for the condition of power grid equipment based on the operating time for a defect. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 123-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.

### **Введение (Introduction)**

Современные тенденции построения систем управления ремонтами оборудования электрических сетей базируются на применении методов неразрушающего контроля (НК), которые обеспечивают сбор диагностической информации с непосредственно работающего объекта без ограничения его пребывания в работоспособном состоянии [1-4]. В этих условиях данные диагностического контроля приобретают наибольшую значимость с точки зрения оценки текущего технического состояния объекта, так как отражают его реакцию на функционирование под влиянием рабочих воздействий.

В электрических сетях и электроустановках 6(10) кВ наиболее характерным и массовым видом неисправности является нарушение качества многочисленных контактных соединений, вызывающее их термические перегревы. Эти обстоятельства определили доминирующие позиции подобных неисправностей в интегральной оценке технического состояния электрооборудования (ЭО) 6(10) кВ. Одним из основных методов НК для выявления многообразных термических аномалий при эксплуатации ЭО является метод ТВК [5-7]. Метод ТВК позволяет оперативно и бесконтактно с помощью инфракрасной камеры

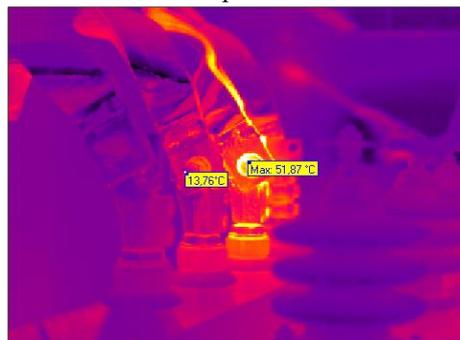
(тепловизора) измерять значение разности температур нагрева поверхности объекта в точке контроля  $\theta_{\text{п}}$  и окружающей среды  $\theta_{\text{с}}$ , °С:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{п}} - \theta_{\text{с}} \quad (1)$$

и фиксировать изображение контролируемого объекта в инфракрасном диапазоне частот. На рисунке 1 представлены термограммы поверхностей различных функциональных узлов трансформаторного оборудования, работающего в составе комплектных трансформаторных подстанций (КТП) 6/0,4 кВ системы электроснабжения нефтепромысла. Термограммы содержат информацию о техническом состоянии функциональных узлов в форме максимальных температур нагрева поверхностей °С в зоне предполагаемого дефекта. К достоинствам ТВК помимо бесконтактного способа применения относят: мобильность и простоту доставки тепловизора на объекты электрохозяйства, универсальность и доступность метода для широкой линейки ЭО.



ТМ-630 6/0,4 кВ КТП-1 К-152Б



ТМ-630 6/0,4 кВ КТП-2 К-160А

Рис. 1. Термограммы дефектных трансформаторов

Fig. 1. Thermograms of defective transformers

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Регламент ТВК предусматривает периодическое пребывание тепловизора на линиях электропередачи (ЛЭП) и подстанциях (ТП) электрических сетей, получение и расшифровку термограмм, выдачу диагностических заключений и формирование протоколов. По полученным заключениям специалисты производят отбраковку ЭО и объектов электрической сети с выявленными признаками термических дефектов. После чего планируется корректирующее воздействие на объект с целью устранения выявленного опасного дефекта и предотвращения отказа.

Возможности достаточно частого воспроизведения инфракрасных измерений на однотипных объектах стимулируют диагностов энергокомпании к формированию цифровых архивов термограмм. Востребованность создания диагностического архива термограмм, структурированного по сетевым районам и производственным отделениям компании, обусловлена не только тем, что существенно ускоряет идентификацию вновь обнаруживаемых в ЭО дефектов и повышает её достоверность, но также тем, что увеличивает репрезентативность статистических выборок по типам контролируемых объектов, видам дефектов и стадиям их развития [8]. Таким образом, наличие актуальной и представительной статистики диагностических измерений ЭО является не просто результатом исполнения регламента оперативной эксплуатации, но служит необходимым условием для создания распределенной системы предиктивного управления его техническим состоянием.

Целью статьи является обоснование перспективности данного направления как альтернативы применению более затратных локальных систем on-line мониторинга термических аномалий в ЭО на основе современных температурных датчиков. Это направление оформилось в последнее десятилетие как отклик на ухудшение ситуации по надежности и пожарной безопасности в электрических сетях 0,4-10 кВ и базируется на разработках температурных датчиков, использующих различные (в том числе не «джоулевы») физические эффекты. Представленное в [9-11] техническое решение состоит в использовании газогенерирующих наклеек на контактных соединениях ЭО, газового датчика и контрольно-приёмного устройства. При нагреве контактного соединения выше предельно-допустимой температуры газогенерирующие наклейки изменяют окраску и выделяют сигнальный газ, который фиксируется газовым датчиком. Сигнал о перегреве передается по информационной цепи на пожарную сигнализацию или в центр принятия

решений, где формируется и обрабатывается соответствующая управляющая команда. Другое решение [12] связано с применением пассивных температурных датчиков на основе поверхностных акустических волн (ПАВ). Система мониторинга температуры токоведущих частей ЭО, использующая ПАВ датчики, обладает повышенной точностью, возможностью идентификации точки измерений температуры по радиочастотному датчику, высокой радиационной стойкостью. Одно из комбинированных решений представляет комплекс мониторинга температуры ПАРМА КМТ [13], который выполняет ряд задач в электроустановках 6-35 кВ и отвечает основным требованиям заказчиков. Не смотря на индивидуальные достоинства представленных on-line решений, все они имеют локальную область применения, ограниченную особенностями монтажа, дальностью передачи информации и количеством опрашиваемых датчиков. Возможности их применения в масштабе распределительных электрических сетей нефтепромыслов с большим количеством и значительной удаленностью объектов 6-35 кВ существенно ограничиваются относительно высокой стоимостью оборудования и эксплуатационными затратами. По оценкам разработчика системы «ТермоСенсор», позиционирующего её как самое дешёвое решение в мире по обнаружению перегревов ЭО [9], затраты на обвязку одной ТП-6(10)/0,4 кВ в среднем составляют 1% от её стоимости. Если учесть, что количество подобных объектов лишь в одном из производственных отделений энергосервисной компании достигает 300-500 единиц, становится очевидной высокая стоимость реализации при масштабировании локальных on-line решений. Кроме того не исследованными остаются вопросы по интеграции подобных решений в корпоративные системы управления производственными активами [14], что также ограничивает область их применения. Перечисленные факторы даже без детальных расчетов дают представление об экономии затрат в вариант off-line системы, учитывая что её диагностическая и вычислительная инфраструктура уже сформированы и функционируют. Таким образом, в указанных условиях актуальны исследования в направлении создания распределенных off-line систем управления ремонтами ЭО 6(10) кВ на основе статистики ТВК с прогнозированием наработки на дефект и определением оптимальной периодичности профилактического обслуживания.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Исследование и разработка системы поддержки принятия решений (СППР) по эксплуатации объектов в электрических сетях 6(10) кВ нефтепромыслов выполнялись в следующем порядке:

- 1) Выбор контролируемых объектов;
- 2) Определение исходной диагностической информации, способов обработки и накопления данных о развитии дефектов;
- 3) Классификация состояний ЭО (стадий развития дефектов) и формирование статистических выборок;
- 4) Формализация предиктивной модели наработки на дефект и её верификация;
- 5) Моделирование процессов обслуживания по техническому состоянию и получение функциональной зависимости периодичности профилактик ЭО от прогнозируемой наработки на дефект;
- 6) Разработка архитектуры СППР и набора её функций;
- 7) Валидация системы на реальных наборах данных.

Контролируемыми объектами электрических сетей 6(10) кВ являются воздушные и кабельные линии электропередачи (ВЛ, КЛ), а также оборудование ТП (трансформаторы, коммутационные аппараты, заземляющие устройства, др.). Одним словом всё, что в процессе эксплуатации подвергается периодическому ТВК. Перечень ЭО с данными технических паспортов и историей их эксплуатации хранится в электронной базе данных каждого структурного подразделения (сетевое район, производственного отделения, энергосервисной компании). В качестве диагностической информации по каждому из объектов контроля фигурирует протокол ТВК, который содержит дату измерения, и результат в виде инфракрасного изображения зоны контроля с выделением разности температур  $\Delta\theta$  °С нагрева поверхности объекта и окружающей среды. Кроме этого протокол содержит диагностическое заключение об отсутствии / наличии дефекта в ЭО, предполагаемой стадии развития и рекомендаций о целесообразном порядке дальнейшей эксплуатации (введения корректирующего воздействия). Отбраковка ЭО выполняется по параметру состояния (1) с применением правил идентификации стадии развития дефекта, утвержденных корпоративным регламентом. В таблице 1 в качестве примера показаны критерии идентификации дефектов в ЭО по результатам ТВК из корпоративного регламента энергосервисной

компании ООО «Ноябрьскэнергонефть». В примере (табл. 1) использована известная трехуровневая шкала идентификации, по которой стадии развития дефекта включают: «начальную» «Н» – при незначительном превышении одним или несколькими параметрами состояния установленных предельных норм; «развитую» «Р» – при значительном превышении; «аварийную» «А» – при критическом превышении. В соответствии с указанной классификацией дефект типа «Н» не нуждается в учащенном контроле и допускает продолжение эксплуатации ЭО в штатных режимах. Напротив, дефект типа «Р» требует учащенного контроля и нуждается в устранении при ближайшем по графику плановом отключении объекта. Аварийная стадия развития дефекта «А» наиболее опасна внезапным возникновением отказа. Поэтому фиксация в электрооборудовании дефекта типа «А» требует от службы эксплуатации особого внимания и незамедлительного отключения объекта для устранения выявленного дефекта. В проведенном исследовании анализу подлежит случайный процесс развития дефектов в ЭО электрической сети 6(10) кВ. В связи с этим в рассмотрение введен параметр потока дефектов, в качестве которого использован интервал наработки на дефект в определенной стадии развития, рассчитываемый по формуле:

$$\tau_d^k = DT_0 \frac{N_d}{N_d^k} \quad (2)$$

Таблица 1  
Table 1

Классификация дефектов по результатам ТВК  
*Classification of defects based on the results of thermal imaging control (TIC)*

Диапазон параметра	Стадия развития дефекта	Рекомендация по эксплуатации
$\Delta\theta \leq 5^\circ\text{C}$	«Н» начальная	Периодический контроль
$5 < \Delta\theta \leq 35^\circ\text{C}$	«Р» развитая	Ревизия во время ближайшего профилактического ремонта
$\Delta\theta > 35^\circ\text{C}$	«А» аварийная	Срочный вывод из работы для восстановления

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Здесь:  $N_d^k$ , шт. – количество протоколов ТВК ЭО с выявленными дефектами в  $k$ -й стадии развития;  $N_d$ , шт. – суммарное количество дефектных протоколов;  $DT_0$ , час/лет – стартовый интервал наблюдения (исходная глубина ретроспективы). Таким образом, цензурированные выборки формируются по параметру (2) на интервале наблюдения  $DT_0$  по каждому из объектов, типов ЭО 6(10) кВ и стадии развития дефектов. Ключевую роль с точки зрения репрезентативности формируемых выборок играет глубина ретроспективы. Исследованиями [8] установлены целесообразные границы стартового интервала наблюдения, обеспечивающие допустимую представительность привлекаемой статистической информации  $5 \leq \Delta T_0 < 8$ .

В качестве математического аппарата для построения предиктивной вероятностной модели, описывающей стохастический процесс изменения наработки на дефект  $k$ -й стадии развития в ЭО, могут быть использованы скрытые Марковские процессы (Hidden Markov Processes) [15, 16]. Скрытые Марковские модели (СММ) описывают два случайных процесса. Первый, наблюдаемый случайный процесс является основным и контролируемым. Информация от него доступна в результате периодических наблюдений. Второй случайный процесс представляется скрытым, а его параметры следует определять на основе доступных наблюдений. В рассматриваемом случае основным процессом является процесс диагностирования (ТВК) ЭО, а скрытым – процесс возникновения и развития дефекта. Поскольку применение СММ к задачам анализа дефектов в ЭО недостаточно изучено, в исследовании использован подход на основе штатных методов теории вероятности и математической статистики, обработки данных и проверки гипотез [17]. Предложен следующий алгоритм расчетов:

- 1) для каждого вида ЭО составляются выборки данных на интервале наблюдения 8640 часов (1 год);
- 2) задаются количества элементарных временных интервалов внутри полного интервала наблюдения;
- 3) для каждого элементарного интервала определяется количество выявленных по критериям отбраковки дефектов  $k$ -й стадии развития;

4) формируются интегральные функции распределения случайной величины интервала наработки (2):  $F(\tau_d^H)$ ;  $F(\tau_d^P)$ ;  $F(\tau_d^A)$ ;

5) производится аппроксимация интегральных функций распределения интервала наработки  $\tau_d^k$  полиномом вида:  $A \cdot \ln(\tau_d^k) + B$ , где А и В – вычислительные константы;

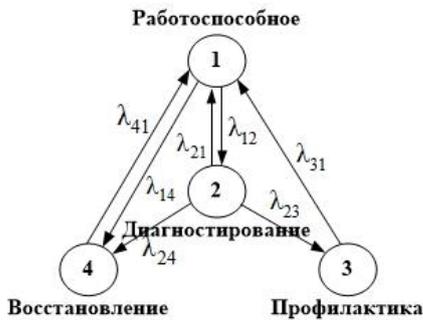
6) выполняется проверка статистической гипотезы о законе распределения наработки на дефект;

7) определяются вероятности противоположных событий:  $P(\tau_d^k)$  – вероятность не возникновения дефекта  $k$ -й стадии развития в ЭО на рассматриваемом интервале наработки;  $Q(\tau_d^k) = 1 - P(\tau_d^k)$  – вероятность возникновения дефекта;

8) по заданной вероятности производится определение среднего значения частоты возникновения дефекта  $\omega_d^k = 1/\tau_d^k$  (час<sup>-1</sup>/год<sup>-1</sup>).

Полученные модели позволяют с заданной вероятностью прогнозировать значение частоты возникновения дефекта (наработки на дефект) определенной стадии развития для любого типа контролируемого ЭО на интервале  $DT$ . Проведенная верификация моделей на актуальных наборах данных показала, что наиболее достоверные результаты получаются при  $DT = 1 \div 2$  года. Новая диагностическая информация, пополнившая за это время базы данных ТВК, участвует в расчетах по корректировке предиктивных моделей на следующем интервале времени.

Для описания процессов обслуживания по техническому состоянию и получения функциональной зависимости периодичности профилактик ЭО  $T_{II}$  от прогнозируемой частоты возникновения дефектов  $\omega_d^k$  эффективны однородные Марковские (полумарковские) модели с дискретными состояниями и непрерывным временем [8, 18]. На рисунке 2 показан направленный граф состояний унифицированной модели технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) по фактическому состоянию ЭО. Вершины графа представляют состояния, в которых может находиться ЭО в процессе эксплуатации, а дуги обозначают переходы из одного состояния в другое.



$$\begin{aligned} \lambda_{12} \cdot \pi_1 - (\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}) \cdot \pi_2 &= 0 \\ \lambda_{23} \cdot \pi_2 - \lambda_{31} \cdot \pi_3 &= 0 \\ \lambda_{14} \cdot \pi_1 + \lambda_{24} \cdot \pi_4 - \lambda_{41} \cdot \pi_4 &= 0 \\ \sum_{i=1}^4 \pi_i &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

- 1 – работоспособное состояние ЭО;
- 2 – состояние диагностирования;
- 3 – состояние профилактики;
- 4 – состояние аварийного ремонта.

Рис. 2. Граф состояний модели ТОиР ЭО

Fig. 2. Graph of states of the MRO EO model

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Здесь:  $\pi_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – финальные вероятности состояний ЭО;  $\lambda_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, n; i \neq j$ ) – интенсивности переходов из  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние в процессе эксплуатации. Указанные интенсивности представляют собой функции периодичностей и продолжительностей предписанных эксплуатационных операций. Так, например:  $\lambda_{12} = \Delta t^{-1}$  ( $\Delta t$  – периодичность диагностирования, ТВК);  $\lambda_{14} = \omega = \omega_0 + b \cdot t$  учитывает изменение средней частоты отказов ЭО под влиянием процессов старения ( $\omega_0$ , год<sup>-1</sup> – начальное значение частоты отказов;  $b$ , год<sup>-2</sup> – темпы старения ЭО). Преобразования системы уравнений (3) позволяют получить выражение для искомой периодичности профилактик как среднего времени пребывания ЭО в работоспособном состоянии [8]:

$$T_{II} = \frac{1 + \Delta t^{-1} \cdot T_k + (\omega + q_3 \cdot \Delta t^{-1}) \cdot T_{AB}}{q_2 \cdot \Delta t^{-1}}, \quad (4)$$

где:  $T_k$  и  $T_{AB}$  – средние продолжительности ТВК и аварийного восстановления ЭО, а  $q_2$  и

$q_3$  – вероятности исходов диагностирования ЭО, которые обозначают, что за время  $\Delta t$  между двумя очередными сеансами ТВК дефект  $k$ -й стадии появится, но не успеет ( $q_2$ ) или успеет ( $q_3$ ) перейти в отказ. Вероятности этих исходов совместно с  $q_1$ , обозначающей вероятность того, что за время  $\Delta t$  дефект не успеет возникнуть, составляют полную группу событий и являются функциями средней частоты возникновения дефектов  $\omega_d$ :

$$q_1 = e^{-\omega_d \Delta t}; \quad q_2 = \frac{\omega^{-1} \cdot (e^{-\omega \Delta t} - e^{-\omega_d \Delta t})}{\omega^{-1} - \omega_d^{-1}}; \quad q_3 = 1 - \frac{(\omega^{-1} \cdot e^{-\omega \Delta t} - \omega_d^{-1} \cdot e^{-\omega_d \Delta t})}{\omega^{-1} - \omega_d^{-1}}. \quad (5)$$

Численное моделирование по выражениям (4), (5) в программном комплексе MathCAD при вариации  $\omega_d^P$  в интервале от 0,1 до 1,0 год<sup>-1</sup> обеспечило формирование корреляционной функции  $T_{II}(\omega_d^P)$  (рис. 3) с аппроксимацией её полиномом вида

$$T_{II} = C \cdot (\omega_d^P)^D. \quad (6)$$

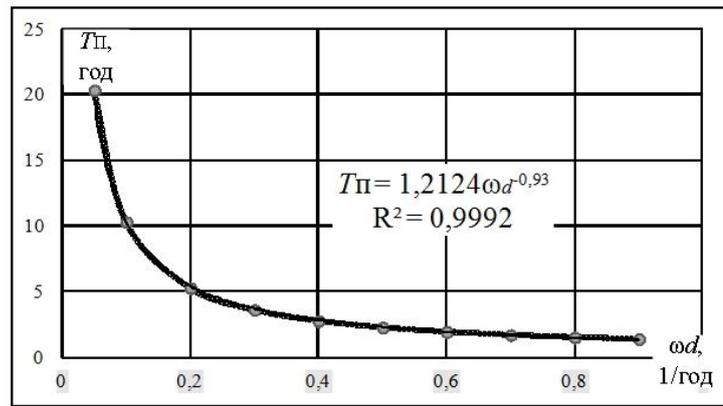


Рис. 3. Корреляционная функция  $T_{II}(\omega_d^P)$  и её полиномиальная аппроксимация

Fig. 3. Correlation function  $T_{II}(\omega_d^P)$  and its polynomial approximation

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Исследованиями установлены вычислительные особенности определения коэффициентов  $C$  и  $D$  полинома для различных объектов и типов ЭО [18]. Так, например, для оборудования ТП, включая силовые трансформаторы, коэффициенты представляют собой функции периодичности диагностирования  $\Delta t$ , которые представлены следующими выражениями:

$$C = e^{0,349 \cdot \Delta t}, \quad D = 0,142 \cdot \ln(\Delta t) - 0,801. \quad (7)$$

Зависимость коэффициентов полинома от частоты отказов  $\omega$  практически не проявилась, и ею можно пренебречь без потери точности. Для ВЛ же наоборот характерной является зависимость коэффициентов полинома от средней частоты отказов  $\omega$ , которая согласно результатам обработки многолетней статистики аварийных отключений ВЛ изменяется в широких пределах от 0,06 до 0,6 год<sup>-1</sup> [8]. Полученная зависимость выглядит следующим образом:

$$C = 0,821 \cdot e^{0,368 \cdot \omega}, \quad D = 0,009 \cdot \ln(\omega) - 1,047. \quad (8)$$

Периодичность диагностирования (ТВК) ВЛ практически не сказывается на значениях коэффициентов полинома, а, следовательно, не влияет на периодичность профилактик (6).

При выполнении численного моделирования с применением выражений (4) и (5) в программной среде MathCAD варьированию в достаточно широких пределах подлежали такие факторы, как темпы старения ЭО,  $b \in [0,001 \div 0,01]$  и периодичность диагностирования (ТВК),  $\Delta t \in [0,1 \div 1,0]$ . Это позволило расширить область существования и достоверного применения предиктивных моделей с учетом влияния значимых факторов.

Таким образом, располагая данными о текущем либо прогнозном значении средней частоты появления развитого дефекта конкретного объекта (типа ЭО)  $\omega_d^P$ , можно аналитически по выражениям (6)-(8) или графически (рис. 3) определить оптимальную в смысле надежности периодичность очередной профилактики  $T_{II}$ .

Архитектура распределенной СППР по управлению техническим состоянием объектов и ЭО 6-35 кВ электрических сетей нефтепромыслов представлена на рисунке 4.

Ей характерен вид классической пирамиды, в основании которой располагается уровень электрохозяйств потребителей. На этом начальном уровне происходит сбор и обработка данных, то есть формирование электронной базы протоколов ТВК, идентификация дефектов в ЭО и составление статистических выборок.

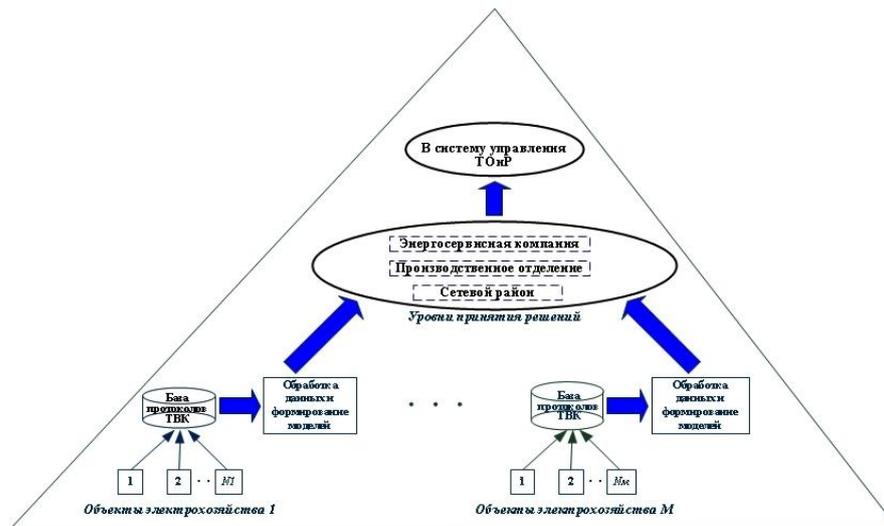


Рис. 4. Архитектура распределенной СППР по управлению состоянием ЭО

Fig. 4. Architecture of a distributed DSS for equipment condition management

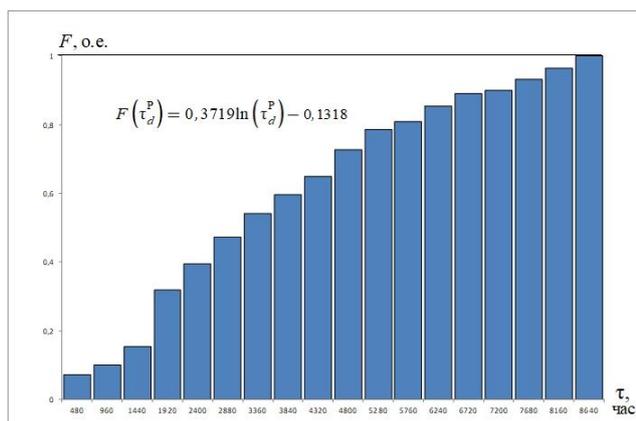
\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Здесь же производится формирование предиктивных вероятностных моделей определения наработки на термический дефект развитой стадии. Возможность прогнозирования развитого дефекта и корректировки периодичности профилактики ЭО на начальном уровне электрохозяйств обеспечивает максимальную адресность в принятии решений по фактическому техническому состоянию каждой единицы ЭО с учетом влияния значимых факторов. Следующие, более высокие уровни СППР повторяют иерархическую структуру предприятия. К ним относятся уровень сетевого района, уровень производственного отделения и уровень энергосервисной компании. Перечисленные уровни системы опираются на расширенные перечни объектов и ЭО и предназначены для интеграции исходной информации, а также принимаемых решений с целью учета территориальных, технологических, финансовых и иных производственных особенностей различных структурных подразделений и энергосервисной компании в целом. Наивысший уровень СППР – это уровень корпоративной системы ТОиР, который отвечает за планирование ремонтов с учетом выделенных ресурсов, контроль реализации планов, оценку их эффективности. Таким образом, за счет активации каждого локального уровня принятия решений обеспечивается реализация принципов распределенности и вертикальной интегрированности системы управления ремонтами ЭО. На рисунке не отражена временная иерархия взаимодействий между уровнями СППР, однако некоторые её характеристики требуют пояснения. Так, начальная база протоколов ТВК формируется на интервале наблюдения  $DT_0 = 5 - 8$  лет. На её основе выполняется построение стартовых математических моделей. Затем по истечении временного периода  $DT = 1 \div 2$  года формируется пополнившаяся и обновленная база диагностической информации, которая участвует в новых расчетах и корректировке математических моделей оценки и прогноза. Процесс функционирования СППР циклически повторяется. Для лучшего представления методики формирования моделей рассмотрим её основные этапы на конкретном практическом примере.

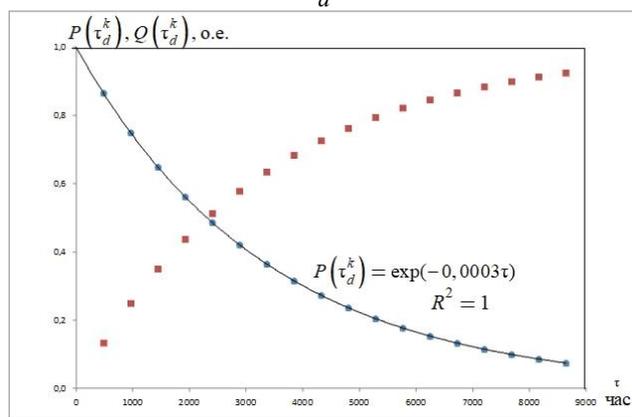
#### Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В качестве примера рассмотрен случайный процесс дефектообразования с фиксацией стадий развития дефектов в ЭО одной из сетевых компаний, питающих объекты нефтепромыслов на территории ЯНАО. Объектами ТВК являлись трансформаторы КТП 6/0,4 кВ одного из электрохозяйств нефтедобычи. При отбраковке ЭО по параметру (1) выполнялась идентификация стадий развития дефекта с помощью критериев (табл. 1). Глубина ретроспективы для обследованных трансформаторов КТП 6(10) кВ в количестве 954 единицы составляла 6 лет с 2008 по 2013 годы и включала 383 дефектных протокола ТВК. Из них 47 протоколов ТВК было идентифицировано как «Н», 229 как «Р», 107 как

«А». Это подтверждало достаточную репрезентативность сформированных статистических выборок. За рассмотренный интервал времени все трансформаторы КТП 6(10) кВ были подвергнуты процедуре ТВК. В связи с этим полученная статистика представляла собой формат данных многолетних стендовых испытаний однотипного оборудования, что определило методы ее обработки. Ежегодный интервал наблюдения 8640 часов разбивался на 18 равных элементарных временных интервалов по 480 часов в каждом. На элементарном временном интервале определялось количество выявленных по критериям таблицы 1 дефектов в  $k$ -й стадии развития. Определены интегральные функции распределения случайной величины интервала наработки  $F(\tau_d^H)$ ,  $F(\tau_d^P)$ ,  $F(\tau_d^A)$ , значения которых позволили найти вероятности обнаружения в трансформаторе дефектов каждой  $k$ -й стадии развития. На рисунке 5-а в качестве примера приведена зависимость  $F(\tau_d^P)$  для самой представительной из выборок данных.



a



b

Рис. 5. Эмпирическая функция распределения вероятности обнаружения дефекта «Р» стадии – а; расчетные вероятности обнаружения дефекта «Р» стадии на интервале наработки – b

Fig. 5. Empirical probability distribution function for detecting a defect of stage «P» – a; calculated probabilities of detecting a defect of stage «P» in the operating time interval – b

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the authors.

На рисунке 5-б показаны вероятности противоположных событий выявления и не выявления в объекте дефектов «Р» стадии на рассматриваемом интервале наработки. Внешний вид указанных функций позволил выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения наработки на дефект, что было подтверждено проверкой соответствующей начальной гипотезы по критерию Колмогорова-Смирнова [17]. Таким образом, искомое значение наработки трансформаторов КТП 6(10) кВ на дефект «Р» стадии  $\tau_d^P$  составило 3333 час. (0,386 год), а средней частоты появления дефекта  $\omega_d^P$  соответственно –  $0,0003 \text{ час}^{-1}$  ( $2,592 \text{ год}^{-1}$ ).

Оценка необходимой периодичности профилактик выполнялась с учётом эксплуатационных параметров контролируемых объектов в формате разработанной математической модели:

$$T_{II} = e^{[0,349 \cdot 1,0]} \cdot 2,592^{[0,142 \cdot \ln(1,0) - 0,801]} = 0,67 \text{ (год)},$$

где:  $\Delta t = 1,0$ ,  $T_k = 0,0001$ ,  $T_{AB} = 0,001$  (год);  $\omega_0 = 0,015$  (год<sup>-1</sup>);  $b = 0,005$  (год<sup>-2</sup>);  $q_1 = 0,12$ ,  $q_2 = 0,6$ ,  $q_3 = 0,28$  (о.е.). Применение зависимостей (6), (7), (8) позволяет установить необходимость плановой профилактики не реже 1 раза в год, что полностью согласуется с наблюдаемой статистикой ТВК и темпами старения обследуемого парка ЭО на интервале 2008 – 2013 лет.

#### **Заключение (Conclusions)**

1. Цифровая трансформация отрасли актуализирует создание эффективных систем управления техническим состоянием многочисленных объектов и оборудования 6(10) кВ в электрических сетях нефтепромыслов. Современные температурные датчики, использующие цветовые, акустические, химические и прочие эффекты для контроля и фиксации термических аномалий в электроустановках, обладают неоспоримыми достоинствами, что обеспечивает их применение в локальных on-line системах мониторинга пожароопасных и особо ответственных объектов. Их применение в системах электроснабжения нефтепромыслов с большим количеством и значительными расстояниями между объектами ограничено особенностями монтажа, дальностью передачи информации и количеством опрашиваемых датчиков. Это многократно повышает стоимость локальных on-line решений и снижает конкурентоспособность по отношению к распределенным off-line системам управления ТОиР ЭО, использующим многолетнюю статистику ТВК и цифровые модели на её основе.

2. В статье предложена архитектура и состав функций СППР по эксплуатации объектов и оборудования 6(10) кВ в электрических сетях нефтепромыслов, реализующей принципы распределенности и интегрированности. Представлена комплексная методика формирования предиктивных моделей для оценки времени наработки на требующий устранения дефект развитой стадии в ЭО, а также адаптивной периодичности введения необходимого корректирующего воздействия. Используемый математический аппарат базируется на методах математической статистики и теории однородных Марковских процессов с непрерывным временем. Это обеспечивает адекватность разработанных цифровых моделей и достоверность получаемых с их помощью оценок. Приведенный числовой пример иллюстрирует этапность и последовательность процедуры расчетов в СППР с применением предложенных решений.

#### **Литература**

1. Ermakova D. A., Fateev V. A. Information System for Predicting the Technical Condition of Electrical Equipment Devices, BIO Web of Conferences 63, 02007 (2023) ASE-2023. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236302007>.
2. Timothy L. J., Shantala A. R., Kevin E. W., Condition Prediction for Manufacturing Electrical Equipment, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 37, Issue 4, 2004, pp. 373-382, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36145-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36145-1).
3. Shcherbatov I., Lisin E., Rogalev A., Tsurikov G., Dvořák M. and Strielkowski W. Power Equipment Defects Prediction Based on the Joint Solution of Classification and Regression Problems Using Machine Learning Methods, *Electronics* 2021, 10, 3145. <https://doi.org/10.3390/electronics10243145>.
4. Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. Риск-ориентированный подход к выбору стратегии управления производственными активами энергетической компании // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2023, Т.25. № 6. С. 29-42. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42.
5. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024, № 26(2). С. 68-77. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77>.
6. Laib dit Leksir Y., Mansour M., Moussaoui A. Localization of thermal anomalies in electrical equipment using Infrared Thermography and support vector machine // *Infrared Physics & Technology*, Vol. 89, 2018, pp. 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.12.015>.
7. Balakrishnan G.K., Yaw C.T., Koh S.P., Abedin T., Raj A.A., Tiong S.K., Chen C.P. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations // *Energies* 2022, 15, 6000. <https://doi.org/10.3390/en15166000>.
8. Левин В.М. Управление надежностью и техническим состоянием оборудования в задачах эксплуатации электрических сетей: монография / В.М. Левин, Д.В. Танфильева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 240 с.
9. Прокопов Е.С., Высокорец С.П., Лесив А.В. Инновационная технология в области обнаружения дефектов контактных соединений и контактов комплектных распределительных

устройств. – Энергетика и нефтегазохимический комплекс Татарстана в начале XXI века, 2020, № 16. Доступно по: <https://energoneftegazhim.ru/cat/89/1038/> (дата обращения 05.09.2024).

10. Высокорец С.П., Лесив А.В. Мониторинг состояния контактной системы электрооборудования в сетях 0,4-10 кВ системой «ТермоСенсор». – Информационный справочник. Вып. 2. Проектирование, монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования, 2018. – С. 30-45.

11. Охлопков А.В., Сигитов О.Ю., Битнев В.Д., Лапухин С.Н., Куницкий А.Г. Технические решения по обнаружению перегрева элементов распределительных устройств напряжением 0,4–10 кВ // *Электричество* 2022, №3. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-3-58-66>.

12. Ситкин М.К., Строганов К.А., Люлин Б.Н., Попова Е.М., Шубарев В.А. Применение беспроводных систем мониторинга температуры ПАВ-Термо производства ОАО «Авангард» в электрических шкафах. Доступно по: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2023/novoe/574-578.pdf> (дата обращения 05.09.2024).

13. Гаврилов А.В. Комплекс мониторинга температуры ПАРМА КМТ // *Электроэнергия. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ*. 2023, №3(78). – С. 126-127.

14. Топильский Д.В. Создание системы управления ремонтами энергетического оборудования на основе риск-ориентированного подхода на базе информационной системы «Управление планово-предупредительными ремонтами энергооборудования (УППРЭ)» // *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2023, № 2(140). С. 94-102.

15. Ephraim Y. and Merhav N. Hidden Markov processes in *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 48, № 6, pp. 1518-1569, June 2002, doi: 10.1109/TIT.2002.1003838.

16. Bouguila N., Fan W., Amayri M. Hidden Markov Models and Applications // *Springer* 2022, ISBN 978-3-030-99141-8. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99142-5>.

17. Смирнов Н.В., Белугин Д. А. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии. – М.: Недра, 1969. – 379 с.

18. Левин В.М., Лукьянова Е.А., Сорокин И.В. Адаптация периодичности технического обслуживания оборудования электрических сетей по наблюдаемой частоте неисправностей. В кн. Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы X Международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГУ, 2015. С. 101-105.

#### Авторы публикации

**Левин Владимир Михайлович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0880-3989>. [levin@power.nstu.ru](mailto:levin@power.nstu.ru).

**Боярова Диана Андреевна** – аспирант Новосибирского государственного технического университета.

#### References

1. Ermakova D. A., Fateev V. A. Information System for Predicting the Technical Condition of Electrical Equipment Devices, BIO Web of Conferences 63, 02007 (2023) ASE-2023. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236302007>. (In Russ).

2. Timothy L. J., Shantala A. R., Kevin E. W., Condition Prediction for Manufacturing Electrical Equipment, IFAC Proceedings Volumes, Vol. 37, Issue 4, 2004, pp. 373-382, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36145-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36145-1).

3. Shcherbatov I., Lisin E., Rogalev A., Tsurikov G., Dvořák M. and Strielkowski W. Power Equipment Defects Prediction Based on the Joint Solution of Classification and Regression Problems Using Machine Learning Methods, *Electronics* 2021, 10, 3145. <https://doi.org/10.3390/electronics10243145>.

4. Levin V.M., Guzhov N.P., Boyarova D.A. Risk-based approach to choosing the production asset management strategy for energy company. // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (6). S. 29-42. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42. (In Russ.).

5. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26(2). S. 68-77. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77>. (In Russ.).

6. Laib dit Leksir Y., Mansour M., Moussaoui A. Localization of thermal anomalies in electrical equipment using Infrared Thermography and support vector machine // *Infrared Physics & Technology*, Vol. 89, 2018, pp. 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.12.015>.

7. Balakrishnan G.K., Yaw C.T., Koh S.P., Abedin T., Raj A.A., Tiong S.K., Chen C.P. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations // *Energies* 2022, 15, 6000. <https://doi.org/10.3390/en15166000>.

8. Levin V.M. Upravlenie nadezhnost'yu i tekhnicheskim sostoyaniem oborudovaniya v zadachah ekspluatatsii elektricheskikh setej: monografiya / V.M. Levin, D.V. Tanfil'eva. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2023. – 240 s. (In Russ).

9. Prokopov E.S., Vysogorec S.P., Lesiv A.V. Innovacionnaya tekhnologiya v oblasti obnaruzheniya defektov kontaktnykh soedinenij i kontaktov komplektnykh raspredelitel'nykh ustrojstv. – Energetika i neftegazohimicheskij kompleks Tatarstana v nachale XXI veka, 2020, № 16. Dostupno po: <https://energoneftegazhim.ru/cat/89/1038/> (data obrashcheniya 05.09.2024). (In Russ).

10. Vysogorec S.P., Lesiv A.V. Monitoring sostoyaniya kontaktnoj sistemy elektrooborudovaniya v setyah 0,4-10 kV sistemoj «TermoSensor». – Informacionnyj spravochnik. Vyp. 2. Proektirovanie, montazh, naladka i ekspluatatsiya elektrooborudovaniya, 2018. S. 30–45. (In Russ).

11. Ohlopkov A.V., Sigitov O.YU., Bitnev V.D., Lapuhin S.N., Kunickij A.G. Tekhnicheskie resheniya po obnaruzheniyu peregreva elementov raspredelitel'nykh ustrojstv napryazheniem 0,4–10 kV // Elektrichestvo 2022, №3. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-3-58-66>. (In Russ).

12. Sitkin M.K., Stroganov K.A., Lyulin B.N., Popova E.M., SHubarev V.A. Primenenie besprovodnykh sistem monitoringa temperatury PAV-Termo proizvodstva OAO «Avangard» v elektricheskikh shkafah. Dostupno po: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2023/novoe/574-578.pdf> (data obrashcheniya 05.09.2024). (In Russ).

13. Gavrilov A.V. Kompleks monitoringa temperatury PARMA KMT // Elektroenergiya. PEREDACHA I RASPREDELENIE. 2023, №3(78). S. 126-127. (In Russ).

14. Topil'skij D.V. Sozdanie sistemy upravleniya remontami energeticheskogo oborudovaniya na osnove risk-orientirovannogo podhoda na baze informacionnoj sistemy «Upravlenie planovo-predupreditel'nymi remontami energooborudovaniya (UPPRE)» // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. 2023, № 2(140). S. 94-102. (In Russ.).

15. Ephraim Y. and Merhav N. Hidden Markov processes in IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 48, № 6, pp. 1518-1569, June 2002, doi: 10.1109/TIT.2002.1003838.

16. Bouguila N., Fan W., Amayri M. Hidden Markov Models and Applications // Springer 2022, ISBN 978-3-030-99141-8. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99142-5>.

17. Smirnov N.V., Belugin D. A. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika v prilozhenii k geodezii. – M.: Nedra, 1969. – 379 s. (In Russ).

18. Levin V.M., Luk'yanova E.A., Sorokin I.V. Adaptatsiya periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya oborudovaniya elektricheskikh setej po nablyudaemoj chastote neispravnostej. V kn. Avtomatizatsiya i energosberezhenie mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo proizvodstv, tekhnologiya i nadezhnost' mashin, priborov i oborudovaniya: materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – Vologda: VoGU, 2015. S. 101-105. (In Russ).

### **Authors of the publication**

*Vladimir M. Levin* – Novosibirsk State Technical University.

*Diana A. Boyarova* – Novosibirsk State Technical University.

*Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика*

**Получено**

**13.09.2025 г.**

**Отредактировано**

**12.02.2025 г.**

**Принято**

**17.03.2025 г.**



## УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Четошникова <sup>1</sup>Л.М., Смоленцев <sup>2</sup>Н.И., Полянская <sup>2</sup>А.В.

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия  
<sup>2</sup>Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,  
г. Новосибирск, Россия  
*uralcm@mail.ru*

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в синхронизации работы источников распределенной генерации и централизованных сетей. Разгрузить наиболее загруженные элементы в сети и уменьшить потребляемую мощность возможно путем локальной выработки электроэнергии при помощи применения распределенной генерации. Научная новизна заключается в местной схеме управления, распределяющей реактивную мощность от каждого сетевого инвертора на основе локальных мгновенных измерений потребляемой и вырабатываемой мощности. Научная новизна заключается в разработке нового метода управления потоками реактивной мощности в энергосистемах, содержащих традиционные и альтернативные источники энергии. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы регулирования качества электроэнергии в комбинированных электрических сетях, содержащих источники альтернативной энергии. МЕТОДЫ. Алгоритм, который использовался для моделирования, состоит из нескольких шагов: сначала задаются случайные значения  $r_k$  и  $x_k$ , которые остаются постоянными для всех последующих этапов моделирования. Для каждого случая задается случайное значение нагрузок и генерации и решается система уравнений для определения уровней напряжения вдоль линии и общих потерь. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности влияния средств управления активной и реактивной мощностями на установившиеся режимы электрической сети. Для режимов 3 и 4 вся часть кривой от крайней левой точки (соответствует наилучшему качеству электроэнергии) до точки, где достигается глобальный минимум (когда потери минимальны) представляет собой возможную область, где можно найти компромисс между снижением потерь и падением напряжения, регулируя  $K$ . Сравнение различных режимов показывает, что максимальная гибкость достигается в режиме 4, когда высокая проникающая способность возобновляемых источников энергии приводит к перепроизводству электроэнергии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Обобщая результаты моделирования, можно сказать, что схема управления потоками реактивной мощности на распределенных фотоэлектрических сетевых инверторах достаточно проста и эффективна. Управление потоками реактивной мощности производится в соответствии с местными значениями потребления активной и реактивной мощности. Схема содержит один обобщенный регулируемый параметр балансировки между локальными запросами для минимизации потока мощности и поддержания требуемого уровня качества электроэнергии.

**Ключевые слова:** локальная электрическая сеть; распределенная генерация; управление потоками энергии; распределение мощности; ЭНЕРНЕТ; накопитель энергии.

**Для цитирования:** Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Полянская А.В. Управление потоками реактивной мощности посредством распределенных генераторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 135 -146. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-135-146.

## CONTROL OF REACTIVE POWER FLOWS BY MEANS OF DISTRIBUTED GENERATORS

Chetoshnikova<sup>1</sup> L.M., Smolentsev<sup>2</sup> N.I., Polyanskaya<sup>2</sup> A.V.

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
<sup>2</sup>Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russia  
*uralcm@mail.ru (Smolentsev N.I.)*

**Abstract:** *THE RELEVANCE of the study lies in synchronizing the operation of distributed generation sources and centralized networks. It is possible to unload the most loaded elements in the network and reduce the consumed power by local generation of electricity using distributed generation. The scientific novelty lies in the local regulation scheme that distributes reactive power from each network inverter based on local instantaneous measurements of consumed and generated power. GOAL. To consider the issues of regulating the quality of electricity in combined electrical networks containing alternative energy sources. METHODS. The algorithm used for modeling consists of several stages: first, random variables  $r_k$  and  $x_k$  are set, which remain constant at all subsequent stages of modeling. For each case, a random value of loads and generation is set and a system of equations is solved to determine the voltage levels along the line and total losses. RESULTS. The article describes the relevance of the topic, considers the features of the influence of active and reactive power regulation on the steady-state modes of the electrical network. For modes 3 and 4, the entire part of the curve from the extreme left point (corresponding to the best power quality) to the point of reaching the global minimum (when losses are minimal) represents a possible area where a compromise can be found between loss reduction and voltage drop by adjusting  $K$ . Comparison of different modes shows that maximum flexibility is achieved in mode 4, when high penetration of renewable energy sources leads to overproduction of electricity. CONCLUSION. Summarizing the simulation results, it can be said that the reactive power flow control scheme on distributed PV grid inverters is quite simple and effective. Reactive power flows are controlled according to local values of active and reactive power consumption. The scheme contains one generalized adjustable parameter for balancing between local demands in order to minimize the power flow and maintain a good level of power quality.*

**Keywords:** *local power grid; distributed generation; energy flow management; power distribution; ENERNET; energy storage.*

**For citation:** Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Polyanskaya A.V. Control of reactive power flows by means of distributed generators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 135-146. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-135-146.

### **Введение (Introduction)**

Электроснабжение значительной части потребителей осуществляется по радиальным электрическим сетям, имеющим, обычно, один источник энергии. Цель исследования разгрузить наиболее загруженные элементы в такой сети и уменьшить потребляемую мощность путем локальной выработки электроэнергии при помощи распределенной генерации.

Включение альтернативных источников энергии в электрическую распределительную сеть снижает качество электроэнергии из-за скачков и провалов напряжения. Они вызваны быстро меняющейся генерацией энергии во время переходных процессов в сочетании с медленной реакцией известных устройств компенсации и управления работой электрооборудования. Научная новизна заключается в разработке нового метода управления потоками реактивной мощности в энергосистемах, содержащих традиционные и альтернативные источники энергии. Практическая значимость работы в том, что результаты работы могут быть использованы как для снижения потерь, так и отклонения напряжения в системах электроснабжения.

Интеграция больших объемов возобновляемой генерации в электрические сети потребует решения ряда проблем [1,2]. Необходимо иметь информацию о возобновляемых ресурсах, в частности, среднестатистической скорости ветра в регионе, активности солнечной энергии, а также о способах генерации, эффективности устройств, трансформирующих энергию альтернативных источников. Различные способы генерации зависят от расположения и топологии сети, от взаимосвязи её составляющих. Помехи разного происхождения как на стороне источника энергии, так и на стороне нагрузки влияют на качество электроэнергии в распределительной сети. Эти помехи влияют на рабочие характеристики параметров электроснабжения потребителей. Поэтому такие параметры качества электроснабжения, как напряжение и частота, должны постоянно контролироваться.

В процессе работы сети могут возникать проблемы, вызванные возобновляемой генерацией и требующие, как правило, принятия оперативных мер по их устранению. Если в распределительной сети включено относительно небольшое количество автономных генераторов, то их влияние на работу сети незначительно и существующие инженерные системы не будут затронуты. Однако при увеличении количества автономных генераторов

в сети их влияние может достичь уровня, при котором будет существенно страдать качество электрической энергии (напряжение и частота). Регулирование напряжения из-за быстрых изменений в генерации локальных источников энергии, вызванных переходными процессами в них, сложно осуществить [3].

Альтернативное решение в сетях с распределенной генерацией состоит в том, чтобы функции управления потоками реактивной мощности для регулирования напряжения возложить на индивидуальные солнечные или ветрогенераторы, работающие с сетевыми инверторами. Дополнительным преимуществом модели интеллектуальной сети, показанной на рисунке 2, является контроль передачи реактивной мощности на каждый сетевой инвертор, что способствует снижению потерь энергии в распределительных сетях. В данном случае в зависимости от мощности сетевые инверторы могли бы генерировать или потреблять реактивную мощность. Однако сегодня действующие стандарты ограничивают целенаправленное введение реактивной мощности или регулирование напряжения автономным генератором [4]. Сегодня назрели изменения в этих стандартах для обеспечения контроля реактивной мощности, что могло бы стать прогрессивным направлением. Однако, даже если они будут внесены в реестр действующих стандартов, останутся вопросы, сколько реактивной мощности нужно передать инвертору, в какое время ее отправить, кто и как будет формировать управляющие сигналы. По сравнению с централизованной системой передачи энергии, количество и разнообразие цепей распределения очень велико, что создает сложность для моделирования индивидуальных генераторов. Поэтому, для оценки и сравнения эффективности разных алгоритмов диспетчеризации реактивной мощности от сетевых инверторов, необходимо применить статистический выборочный подход [5-7].

Имеется ряд работ, в которых рассмотрены вопросы синхронизации источников распределенной генерации. Так в работе [8] описан процесс управления потоками мощности между производителями (локальными распределенными источниками) и потребителями электроэнергии. Этот процесс осуществляется через единый управляющий центр, в который поступает информация о состоянии объектов распределенной сети – уровне выработки электроэнергии генераторами и уровне текущей нагрузки потребителей. Анализ данных в центре управления позволяет выработать и принять решение о перераспределении мощности между объектами. В статье предложена схема, описывающая динамический процесс перераспределения мощности между объектами сети для эффективного управления энергоресурсами.

В работе [9] представлены результаты исследования влияния присоединенной малой генерации на качество электрической энергии в узлах прилегающего района. Для учета влияния предложена технологическая и функциональная модели. В работе [10] предложено применение виртуальных электрических станций (ВЭ), способных обеспечить сглаживание пиков нагрузки и создавать резерв мощности в системе. ВЭ – это телеинформационная система, которая в режиме реального времени собирает сведения о доступной энергии и дефиците энергии на обслуживаемой территории, доступности свободной мощности потребителей, оптимальном графике нагрузки системы. Это обеспечивает гибкость использования энергии источников и оптимальной мощности потребителя, позволяет автоматически определять эффективный источник энергии в текущий момент источник с учетом массы различных факторов, включая ситуацию на рынке энергии и прогноз погоды. Для решения данной задачи используются сетевые технологии ЭНЕРНЕТ [11].

Обеспечить функционирование такой инфраструктуры невозможно без современных технологий и устройств, без оперативного интеллектуального управления и информационных технологий. Ожидаются изменения в способах производства, распределения и потребления задач. В работе [12] приводится описание компьютерной модели, реализованной в программе MATLAB. Это модель позволяет объединить кластеры постоянного и переменного тока на базе энергоустройств с установками распределенной генерации и накопителями электроэнергии. Разработанная модель обладает универсальностью и позволяет исследовать разные источники распределенной генерации и потребителей электроэнергии. Представлены результаты моделирования с помощью энергетических роутеров и накопителей электроэнергии провалов напряжения в нормальном и аварийном режимах работы кластеров, а также проведены исследования предлагаемых методов управления напряжением.

Установлена следующая роль накопителей энергии: в режиме работы без накопителей электроэнергии применение энергетических роутеров с регулируемым инвертором позволяет уменьшить глубину провала напряжения; постоянно подключенные к сети накопители электроэнергии обеспечивают стабильность напряжения в сети;

последовательно подключенные накопители электроэнергии обеспечивают напряжение в сети постоянного и переменного тока на номинальном уровне. В работе [13] исследован инновационный способ прямого включения объектов малой (синхронной) генерации в электрические сети методом применения специальной автоматики (виртуального роутера).

Это способ решает сразу несколько задач: повышает устойчивость параллельной работы, ограничивает токи КЗ, исключает ударные моменты на валу синхронных машин, не требует согласования защиты внешней сети с защитами и автоматикой присоединяемой сети с альтернативной электростанцией.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

В данной работе предлагается местная схема управления, распределяющая реактивную мощность от каждого сетевого инвертора на основе локальных мгновенных измерений потребляемой и вырабатываемой мощности.

Исходными данными для создания модели распределительной сети и управления потоками мощности будут ее параметры: расстояние между узлами нагрузки, активная и реактивная мощность, потребляемая нагрузкой, и генерация от возобновляемых источников энергии. При создании и реализации схемы индивидуальные характеристики узлов и значения нагрузок выбираются случайным образом из возможных вариантов. Из данного набора параметров создается и анализируется схема для оценки различных сценариев, например, когда есть много небольших фото- или ветрогенераторов, но их выдача незначительна по сравнению со потребляемой мощностью нагрузки, или, когда они выдают значительное количество мощности в сеть, приводящую к изменению напряжения.

Предложенный анализ позволяет оценить эффективность разных алгоритмов на различных распределительных сетях. Этот анализ может использоваться регулирующими органами для ответа на вопрос: какая избыточная мощность сетевого инвертора потребуется для регулирования напряжения при большом диапазоне распределительных сетей. Предполагается, что локальный метод контроля и управления реактивной мощностью позволит сэкономить порядка 80% потерь в сравнении с централизованным управлением, основанным на решении задач полной оптимизации.

Главная особенность сетевых инверторов – это наличие синхронизации выходного напряжения и тока с напряжением и током стационарной сети. Сетевые инверторы преобразуют постоянный ток солнечных батарей, выпрямителей ветрогенераторов и других альтернативных источников энергии в переменный ток, причем необходимо совпадения частоты и фазы тока с частотой и фазой стационарной сети.

Синхронизированный по частоте и фазе с входящим напряжением ток, поступает от сетевого инвертора в нагрузку. Для полного использования энергии автономного источника напряжение инвертора должно быть выше напряжения в сети.

По стандарту для распределенной генерации [7], ветровые и солнечные электростанции должны обеспечивать выдачу и потребление реактивной мощности с  $\cos \varphi = 0,85$  в точке примыкания электростанции к энергосистеме. Сетевые инверторы сами не могут выдавать или потреблять реактивную мощность или пытаться каким-либо образом регулировать напряжение. В нормальном режиме они должны работать с коэффициентом мощности, равным единице.

Рассмотрим возможность сетевого инвертора по ограничению реактивной мощности. На рисунке 1 показана диаграмма изменения реактивной мощности в зависимости от значений полной и активной мощности нагрузки.

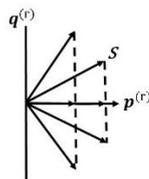


Рис. 1. Векторная диаграмма изменения реактивной мощности Fig. 1. Vector diagram of changes in reactive power

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как следует из диаграммы

$$|q^{(T)}| \leq \sqrt{S^2 - (p^{(T)})^2},$$

где  $q^{(T)}$  и  $p^{(T)}$  – соответственно реактивная и активная мощности, вырабатываемые альтернативным источником.

Если полная мощность  $S$  инвертора превышает активную мощность  $p^{(T)}$ ,

генерируемую источником, допустимый диапазон реактивной мощности определяется как

$$|q^{(r)}| \leq \sqrt{s^2 - (p^{(r)})^2} = q^{\max}$$

В случае максимальной выработки активной мощности ветро- или солнечной электростанцией  $p^{(r)} = p^{(r)\max}$ , диапазон доступной реактивной мощности  $q^{(r)}$  будет минимален.

Важной задачей работы является создание основы для статистического анализа распределительных цепей. Прежде всего нужно определить минимальные значения  $S$  относительно  $p^{(r)\max}$ . Решение этой задачи сильно осложняется нестабильностью работы альтернативных источников энергии. Во время облачности, или когда угол наклона солнца не идеально совмещен с фотоэлектрическими панелями, или безветрия, реальная мощность генерации значительно меньше максимальной  $p^{(r)} < p^{(r)\max}$ . Отсюда следует, что диапазон допустимой реактивной мощности будет зависеть от времени года, дня и погодных условий. Для моделирования этой ситуации, нужно сделать анализ для различных значений  $p^{(r)}$  при сохранении фиксированных абсолютных значений [14].

Распределение мощности в узле нагрузки, содержащем генератор и связанным с энергетической системой, показано на рисунке 2.

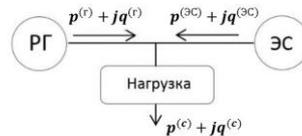


Рис. 2. Распределение мощности в узле нагрузки

Fig. 2. Power distribution in the load node

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Запишем уравнения для распределенных потоков активной и реактивной мощности в радиальной схеме (рис. 3):

$$p_{i+1} = p_i - r_i \cdot \frac{p_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} - p_{i+1}, \quad (1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \cdot \frac{p_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} - q_{i+1}, \quad (2)$$

$$U_{i+1}^2 = U_i^2 - 2(r_i p_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \cdot \left(\frac{p_i^2 + Q_i^2}{U_i^2}\right), \quad (3)$$

где  $p_i + jq_i$  — комплексная мощность, направленная от узла  $i$  к узлу  $i+1$ ,  $U_i$  — напряжение в узле  $i$ ;  $r_i + jx_i$  — комплексное сопротивление линии между узлом  $i$  и  $i+1$ ;  $p_i + jq_i$  — комплексная мощность в узле  $i$ . Мощности  $p_i$  и  $q_i$  состоят из местного потребления  $p_i^{(c)}$  минус местная генерация за счет сетевого инвертора, т.е.  $p_i = p_i^{(c)} - p_i^{(r)}$  и  $q_i = q_i^{(c)} - q_i^{(r)}$ . Из четырех составляющих в  $p_i + jq_i$   $p_i^{(c)}$ ,  $p_i^{(r)}$  и  $q_i^{(c)}$  не изменяются, в то время как реактивную мощность, вырабатываемую сетевым инвертором  $q_i^{(r)}$ , можно регулировать.

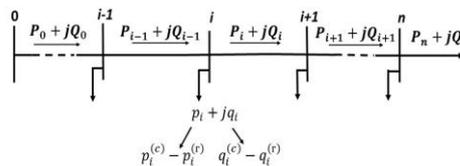


Рис. 3. Схема радиальной сети

Fig. 3. Radial network diagram

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При выполнении условий  $p^{(c)} = p^{(r)}$  и  $q^{(c)} = q^{(r)}$  переток мощности из сети будет близок к нулю, но в обратном случае переток мощности возрастет и произойдет отключение от сети с изменением параметров напряжения и частоты.

В случае  $p^{(c)} > p^{(r)}$  и  $q^{(c)} > q^{(r)}$  переток мощности из сети положительный, поэтому произойдет отключение от сети, что вызовет резкое снижение напряжения и частоты. При обратном соотношении мощностей отключение также произойдет, но с увеличением напряжения и частоты.

При разнонаправленных потоках активной и реактивной мощностей ситуация усложняется, но после определенных расчетов серии режимов можно определить предельные значения напряжений и частоты, скорости их изменения.

На схеме (рис. 3) введены следующие обозначения:  $P_i$  активная и  $Q_i$  реактивная мощности, протекающие по цепи от узла  $i$ ;  $P_0$  и  $Q_0$  – потоки мощности от подстанции;  $p_i$  и  $q_i$  соответствуют потокам мощности в узле  $i$ , где соответствующие положительные (отрицательные) значения  $p_i^{(c)}$  и  $q_i^{(c)}$  ( $p_i^{(r)}$  и  $q_i^{(r)}$ ) представляют потребление (выработку) мощности в узле. Местный контроль параметра  $q_i^{(r)}$  узла может быть как положительным так и отрицательным, но ограничен по абсолютной величине, как описано в уравнении 4. Полная мощность инвертора  $S_i$  равна заданному значению, сравниваемому с  $\max p_i^{(r)}$ , но превышающая его.

$$-\sqrt{S_i^2 - (p_i^{(r)})^2} < q_i^{(r)} < \sqrt{S_i^2 - (p_i^{(r)})^2}.$$

Как было сказано выше, вырабатываемая узлом  $i$  мощность  $q_i^{(r)}$  ограничивается реактивной возможностью инвертора:

$$\forall_i = 1, 2 \dots n : |q_i^{(r)}| \leq \sqrt{S_i^2 - p_i^{(r)2}} \equiv q_i^{\max}, \quad (4)$$

Следует отметить, что выработка реактивной мощности возможна только в узлах с генерацией. Для остальных узлов нужно принять  $S_i = 0$ . Для большинства фидерных сетей, которые являются предметом исследований, нелинейные члены в уравнениях (1,2,3) относительно малы, также малы отклонения напряжения вдоль линии. Практически эти приближения соответствуют малым значениям потерь, но данные приближения необходимо проверять, когда  $\frac{r_i P_i}{U_i^2} \ll 1$ .

При этих допущениях уравнения потоков мощности могут быть описаны линейными уравнениями:

$$p_{i+1} = p_i - p_{i+1}^{(c)} + p_{i+1}^{(r)}, \quad (5)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - q_{i+1}^{(c)} + q_{i+1}^{(r)}, \quad (6)$$

$$U_{i+1} = U_i - (r_i p_i + x_i Q_i) / U_0, \quad (7)$$

где используется приближение  $U_k^2 \approx U_0^2 + 2U_0(U_k - U_0)$ .

В рамках линеаризованной модели скорость рассеяния энергии (потери) в распределительной сети определяется выражением

$$\Delta p = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \cdot \frac{p_i^2 + Q_i^2}{U_0^2}, \quad (8)$$

Сведение к минимуму или, по крайней мере, сохранение потерь на приемлемо низком уровне является естественной целью для оптимизации и контроля. Тем не менее, отклонения напряжения в узлах сети должны оставаться в рамках строгого регулирования границы. Эти границы соблюдаются, если максимальное отклонение удельного напряжения  $\delta U$  подчиняется условию

$$\delta U = \max_k \left| \frac{U_k - U_0}{U_0} \right| < \varepsilon, \quad (9)$$

где  $\varepsilon \approx 0,05$  при нормальной работе. Цель оптимизации стабильности напряжения заключается в поддержании  $\delta U$  в заданных пределах.

Далее рассмотрены методы локального контроля с целью достижения минимизации потерь (8) и отклонения напряжения (9). Локальную схему управления следует рассматривать как приближенное/эвристическое решение следующей задачи многокритериальной оптимизации

$$\min_{q^{(r)}} [\Delta p, \delta U]^T, \quad (10)$$

Локальность схемы управления соответствует требованию, что  $q_k^{(r)}$  зависят только от локальной информации, которую мы ограничиваем на  $p_k^{(r)}$ ,  $p_k^{(c)}$ ,  $q_k^{(c)}$ . Другая локальная переменная, которую можно было бы использовать, - это  $U_k$ , с помощью которой можно было бы легко привести к неравенству. Например, инвертор генератора в конце сети будет

постоянно иметь более низкое напряжение по сравнению с инвертором в начале распределительной сети. В этом случае он передает запрос на ввод реактивной мощности, что приведет к более быстрому износу инвертора. Предлагаемая схема основана на локальном потреблении и выработке активной и реактивной мощности и должна обеспечить ее наиболее равномерное распределение по сети.

Предположим, что схема управления однородна по всей линии: все инверторы запрограммированы одинаково, и в зависимости от номера шины  $k$  через инвертор вырабатывается мощность  $S_k$ . В работе схемы локального управления реализуется зависимость

$$q_k^{(r)} = f_k(p_k^{(r)}, p_k^{(c)}, q_k^{(c)}), \quad (11)$$

при ограничениях (4).

Введем вспомогательную функцию,  $Constr_j$ , предназначенную для обеспечения ограничения (4):

$$Constr_j[q] = \begin{cases} q, & |q| \leq q_i^{\max} \\ \left(\frac{q}{|q|}\right) q_i^{\max}, & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (12)$$

Схема локального управления, построенная при условии, что потери минимальны, когда реактивные потоки  $Q_k$  равны нулю рассмотрена в работе [15]. Значения  $q_k^{(r)}$  выбраны для обеспечения минимума реактивных потребляемых мощностей  $(q_k^{(c)} - q_k^{(r)})$  в любом узле сети:

$$f_k^{(L)} = Constr_k[q_k^{(c)}] \quad (13)$$

Но как оказалось, данная схема локального управления оказалась эффективной только в снижении потерь. В данной работе предложено новое решение, с помощью которого обеспечивается достижение обеих целей оптимизации в уравнении (10).

Как следует из уравнения (7), для снижения вариаций  $U_k$  необходимо минимизировать абсолютную величину потока полной мощности  $(r_k P_k + x_k Q_k)$ . Для большинства электрических сетей, обычно, отношение  $r_k/x_k = \alpha$  практически постоянно при всех  $k$  и зависит только от топологии и размера используемых проводников. Отсюда абсолютное значение  $(r_k P_k + x_k Q_k)$  будет равно нулю, если для каждого узла выполним, чтобы

$$p_i^{(c)} - p_i^{(r)} + \alpha(q_i^{(c)} - q_i^{(r)}) = 0.$$

На основании этого вводится следующая функция управления  $f_k^{(U)}$ , направленная на минимизацию колебаний напряжения, пренебрегая при этом потерями мощности:

$$f_k^{(U)} = Constr_k \left[ q_k^{(c)} + \frac{p_k^{(c)} - p_k^{(r)}}{\alpha} \right] \quad (14)$$

Фактически,  $f_k^{(U)}$  может не только удовлетворять потребность в реактивной мощности локальной нагрузки в узле  $k$ , но и обеспечивать питание реактивной мощностью соседних участков распределительной сети. Оптимизация двух целей в (12) может быть обеспечена следующей нелинейных комбинаций

$$f_k = Constr_k [K f_k^{(L)} + (1 - K) f_k^{(U)}], \quad (15)$$

где  $K$  – параметр, оптимизирующий две цели в уравнении (12). При значении  $K = 1$  приходим к схеме (13), а при значении  $K = 0$  схема сводится к (14).

#### **Результаты и обсуждение (Results and discussion)**

Рассмотрим малонагруженную местную распределительную сеть. Пусть номинальное напряжение  $U_0$  составляет 6 кВ, а полное сопротивление линии  $Z = (0,33 + j0,38)$  Ом/км, и является постоянным вдоль всей линии передачи. Расстояние между двумя соседними узлами принимаем равными 0,2 и 0,3 км. Мощности  $p_i^{(c)}$ , потребляемые нагрузками, равномерно распределены в диапазоне между 0 и  $p^{c,max}$ , где  $p^{c,max}$  принимает значение от 1 кВт до 2,5 кВт, и  $q_i^{(c)}$  выбирается случайно из равномерного распределения между  $0,2q_i^{(c)}$  и  $0,3q_i^{(c)}$ . В статье рассмотрено две ступени вхождения в сеть фотоэлектрических систем (ФЭС): 20%, 50%. Причем узлы, трансформирующие солнечную генерацию, выбираются случайным образом. Предположим, что генерируемая мощность  $q_i^{(r)}$  одинакова для всех включенных ФЭС, нагрузки узлов равны 1кВт или 2кВт. Равный уровень выработки фотоэлектрической энергии предполагает установку

идентичных устройств ФЭС при одном и том же  $q_{max}^{(T)}$  и равномерном солнечном излучении. Установленная мощность инвертора в узлах  $S=2,2$  кВт.

Алгоритм для моделирования состоит из нескольких этапов: сначала задаются случайные значения  $r_k$  и  $x_k$ , которые, затем, остаются постоянными для всех этапов моделирования. В каждом случае задаются случайные значение нагрузок и генерации, затем решается система уравнений (5-7). Это позволяет определить уровни напряжения вдоль линии и общие потери.

От уровней вхождения ФЭС зависит профиль напряжения и частотная характеристика сети. Применённая ФЭС имеет коэффициент мощности, равный единице и не потребляет реактивную мощность. Выходная мощности фотоэлектрической системы зависят от инвертора.

Таблица 1

Table 1

Сравнение параметров для разных моделей фидерных линий

Comparison of parameters for different feeder line models

Режим	Проникновение, %	$p^{(T)}$ , кВт	$\delta U_0$	$\Delta P/P_0$	$\Delta P$ , кВт
1	20	1,25	1,0	0,059	7,84
2	20	0,50	2,0	0,014	0,33
3	50	1,25	1,0	0,048	4,66
4	50	0,50	2,0	0,014	1,89

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В статье [10] сделан вывод, что при исследовании влияния облачности на переходные эффекты на работу ФЭС обнаружено, что максимальный уровень проникновения ФЭС в сеть составлял, приблизительно 5%, причем, предел определялся скоростью набора мощности обычных генераторов.

Исследование проблемы регулирования напряжения показало, что при ступени вхождения 15% переходные эффекты в облаке вызывают гораздо значительные, но вполне разрешимые проблемы с колебаниями мощности в энергосистеме. Отсюда следует, что 15% является максимальной ступенью вхождения распределенных фотоэлектрических систем в энергосистему.

В таблице 1 приведены четыре рассматриваемых режима работы, которые соответствуют двум ступеням вхождения ФЭС (20 и 50%) и двум режимам: а) солнечно, не большая нагрузка и б) пасмурно, большая нагрузка. В 1 и 3 режимах работы сети мощность генерации по сравнению с общей нагрузкой системы низкая, но при этом мощность инверторов высокая:  $S/p^{(T)} \approx 2,2$ . В режимах 2 и 4 соотношение генерации и нагрузки противоположное: количество генерируемой энергии в системе равно количеству потреблённой энергии в режиме 2, в режиме 4 происходит избыточная выработка электроэнергии, что приводит к изменению направления потока мощности (схема подает мощность в энергосистему). Мощность инвертора в режимах 2 и 4 относительно мала:  $S/p^{(T)} \approx 1,1$ . Рассмотренные 4 режима позволяют сделать вывод о важности следующих характеристик системы: уровни генерации и нагрузки, времени подключения фотоэлектрических систем и емкость инвертора.

Реактивная мощность регулируется уравнением (15) в соответствии с параметром  $K$ , установленном на одной ступени всех генерирующих узлов. Значение параметра  $K$  лежит в диапазоне значений ( $-5 < K < 10$ ). Данные расчеты позволяют определить как потери мощности  $\Delta P$  так и максимальное отклонение напряжения  $\delta U$ . Эффективность метода управления сравнивается с базовым вариантом, при котором выработка реактивной мощности  $q_k^{(T)} = 0$ . Соответствующие значения  $\Delta P_0$  и  $\delta U_0$  показаны в таблице 1.

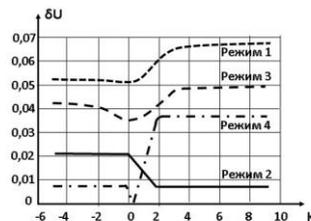


Рис. 4. Зависимость  $\delta U = \max_k \left| \frac{U_k - U_0}{U_0} \right|$  от  $K$  для локального управления согласно (15) и четырех режимов (таблица 1)

Fig. 4. Dependence  $\delta U = \max_k \left| \frac{U_k - U_0}{U_0} \right|$  on  $K$  for local control according to (15) and four modes (table 1)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Зависимость  $\delta U$  от  $K$  приведена на рис.4. Из графиков, приведенных на рис. 4 следует, что наиболее эффективно управление напряжением в режимах 2 и 4, в этих режимах потребляемая мощность небольшая. Значительное уменьшение отклонения напряжения в режиме 4 возможно путем почти полной компенсации обратного потока активной мощности. Это происходит за счет увеличения потребления реактивной мощности. Режимы 1 и 3 соответствуют высокому потреблению мощности, поэтому снижение отклонения напряжения недостаточно значительное, удаётся добиться снижения отклонения напряжения  $\approx 0,01$  в обоих случаях.

Регулирование относительных потерь мощности путем изменения параметра  $K$ , приведено на рисунке 5, что аналогично показателям качества электроэнергии, как показано выше. Наиболее высокий уровень экономии энергии достигается в режимах 2 и 3. В оптимальной точке режима 2 потребление энергии полностью равно генерации. В этом случае величины суммарных потоков мощности  $P_k$ ,  $Q_k$  равны.

Следует отметить, что, хотя относительное снижение потерь достаточно велико в режимах 2 и 4, но их абсолютные значения меньше по сравнению с потерями в режимах 1 и 3 из-за более низких значений  $\Delta P_0$ . Высокое значение абсолютной экономии в режимах 1 и 3 возникает за счет высокого значения относительной мощности инвертора:  $S/p(g) = 2,2$ , что позволяет вводить в сеть большие объемы реактивной мощности.

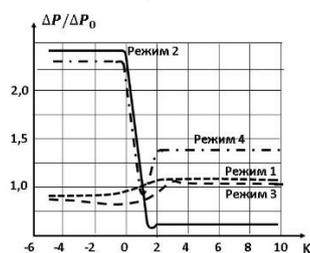


Рис. 5. Зависимость относительных потерь мощности от параметра  $K$  Fig. 5. Dependence of relative power losses on the  $K$  parameter

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Однако, несмотря на высокую степень вхождения, потери в режиме 4 меньше по сравнению с режимом 2. Это можно объяснить значительными потерями, возникающими при обратном перемещении активной мощности. Следует отметить, что в отличие от других режимов, оптимизация потерь в режиме 4 требует более тонкой настройки параметра  $K$ .

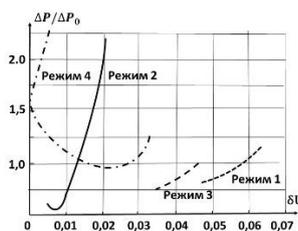


Рис. 6. Зависимость относительных потерь мощности от показателя качества электроэнергии (отклонения напряжения) Fig. 6. Dependence of relative power losses on the indicator of power quality (voltage deviations)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Общую производительность схемы управления 15 проще оценить на комбинированном графике на рис. 6, где одновременно показана эффективность как по  $\delta U$ , так и по  $\Delta P$ . В режимах 1 и 3 крайняя левая точка кривой соответствует наилучшей конфигурации, обеспечивающая наименьшее значение  $\delta U$  и наименьшие потери. С точки зрения многоцелевой оптимизации это соответствует множеству Парето, состоящему из единственной точки. Иная ситуация в случаях 2 и 4, где множество Парето представлено в диапазоне  $K$ . (Этот набор соответствует отрицательным участкам наклона кривых на рис.6).

Для режимов 3 и 4 диапазон от крайней левой точки графика (соответствует наилучшему качеству электроэнергии) до точки, где достигается глобальный минимум (когда потери минимальны) представляет собой возможную область, где, регулируя  $K$ , можно найти компромисс между снижением потерь и падением напряжения. Анализ режимов показывает, что максимальная эффективность локальной схемы управления потоками мощности потоками достигается в режиме 4.

### **Заключение (Conclusions)**

Из результатов моделирования следует, что схема управления потоками реактивной мощности на распределенных фотоэлектрических сетевых инверторах достаточно эффективна. Управление потоками реактивной мощности производится в соответствии с местными значениями потребления активной и реактивной мощности.

Схема содержит один обобщенный регулируемый параметр балансировки между локальными запросами для минимизации потока мощности и поддержания необходимого качества электроэнергии.

Локальная схема управления потоками мощности способна достичь значительного и оптимального, одновременного улучшения качества электроэнергии и повсеместного снижения потерь по всей цепи. Следует отметить, что рассмотрены различные режимы, соответствующие солнечным и пасмурным дням, а также случаи больших и малых нагрузок сети.

Из результатов исследований следует, что порядка 10% избыточной мощности  $S$  инвертора достаточно, чтобы обеспечить снижение как потерь, так и отклонение напряжения. Это позволит использовать предложенный метод управления потоками реактивной мощности в энергосистемах, содержащих традиционные и альтернативные источники энергии. В дальнейших работах планируется исследовать вопросы многоцелевой оптимизации, которые требуют более точной настройки параметров сети.

### **Литература**

1. Кубарьков, Ю. П. Оптимизация режима работы распределительных сетей с активно-адаптивными элементами / Ю. П. Кубарьков, Я. В. Макаров, К. А. Солдаткина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Т. 28, № 4(68). – С. 118-130. – EDN NQKQGI.
2. Квитко, А. В. Особенности внедрения возобновляемых источников энергии в энергетическую систему / А. В. Квитко, А. Д. Сидоренко // Теория и практика финансово-хозяйственной деятельности предприятий различных отраслей. Наука и общество: актуальные проблемы и решения: Сборник трудов конференций: III Национальной научно-практической конференции; Национальной научно-практической конференции, Керчь, 10–29 октября 2021 года. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2021. – С. 452-455. – EDN ХНЕХРТ.
3. Особенности топологии инверторных преобразователей neon<sup>TM</sup> и способов их управления / О. М. Гладышев, Е. И. Медведев, И. М. Трофимов [и др.] // Интеллектуальная электротехника. – 2022. – № 1(17). – С. 61-76. – DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_61. – EDN IMRNER.
4. Герасимов А.С. Требования к ветряным и солнечным электроэнергетическим установкам, работающим в составе энергосистемы // АО «Научно-технический центр Единой Энергетической Системы»; 02 августа 2017 г., Москва, 2017.
5. Ибрагим, М. Стратегии управления электротехническим комплексом высоковольтных линий электропередачи постоянного тока / М. Ибрагим, В. И. Пантелеев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 120-137. – EDN ZAQRS.
6. Илюшин П.В., Лоскутов А.А., Куликов А.Л. Система управления накопителями электрической энергии для расширения области допустимых режимов генерирующих установок источников распределенной генерации при провалах напряжения. Патент РФ на изобретение №2721477. 19.05.2020. Бюл. № 14. Доступно по: [https://patents.s3.yandex.net/RU2721477C1\\_20200519.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2721477C1_20200519.pdf)
7. Ссылка активна на 09.02.2025.
8. Turitsyn K., Sulc P., Backhaus S., Chertkov M. Local Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators: 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications; 4-6 Oct 2010; Gaithersburg, Maryland, USA; 2020. pp. 79-84.
9. Четошニコва Л.М., Смоленцев Н.И., Томских Н.В., и др. Управление потоками мощности в локальных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25 №5. С. 74-82.
10. Marchenko, A. I. Investigation of the Parallel Operation Stability of Minigrd Based on Small Generation with an External Electrical Network of the Power System / A. I. Marchenko, V. V. Denisov, I. S. Murashkina // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021: 15, Novosibirsk, 19–21 ноября 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 120-124. – DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647483. – EDN RWIVVX.
11. Смоленцев Н.И., Четошニコва Л.М., Томских Н.В. Двухстороннее управление энергетическими потоками в распределенных электрических сетях ЭНЕРНЕТ // Материалы

Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы телекоммуникаций»; 19–20 апреля 2023 г. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2023. С. 136-143.

12. Analysis of access to the electricity transmission network using information technologies in some countries / G. Azieva, S. Kerimkhulle, U. Turusbekova [et al.] // E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, 17–19 февраля 2021 года. – Chelyabinsk, 2021. – DOI 10.1051/e3sconf/202125811003. – EDN LBIEVU.

13. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К. В. Регулирование напряжения в микросети постоянного и переменного тока на базе энергоустройств и накопителей электроэнергии // Интеллектуальная электротехника. 2023. Т. 21 №1. С. 62-84.

14. Golubchik, T. V. Distributed generation in small-scale power generation. Search for energy-efficient solutions by automation of complex power systems / T. V. Golubchik, A. S. Kulikov, D. Y. Taratutin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1159, No. 1. – P. 012041. – DOI 10.1088/1757-899x/1159/1/012041. – EDN QHOGMB.

15. Dharmawardena, H.; Kumar Venayagamoorthy, G. Distributed Volt-Var Curve Optimization Using a Cellular Computational Network Representation of an Electric Power Distribution System. *Energies* 2022, *15*, 4438. <https://doi.org/10.3390/en15124438>.

16. Energy management system for hybrid PEMFC-battery power source for stationary consumers / A. Loskutov, A. Dar'nikov, I. Lipuzhin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 55. – P. 1109-1121. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2023.11.275. – EDN WOWUQA.

#### Авторы публикации

**Четошникова Лариса Михайловна** – док. техн. наук, профессор кафедры «Автоматика» ЮУрГУ. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0003-2235-3993>. [chlm56@mail.ru](mailto:chlm56@mail.ru).

**Смоленцев Николай Иванович** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническая электроника» СибГУТИ. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5775-2903>. [uralcm@mail.ru](mailto:uralcm@mail.ru).

**Полянская Анна Валерьевна** – старший преподаватель кафедры «Техническая электроника» СибГУТИ. [pav@sibguti.ru](mailto:pav@sibguti.ru).

#### References

1. Kubarkov, Yu. P. Optimization of the operating mode of distribution networks with active-adaptive elements / Yu. P. Kubarkov, Ya. V. Makarov, K. A. Soldatkina // Bulletin of Samara State Technical University. Series: Technical sciences. - 2020. - Vol. 28, No. 4 (68). - Pp. 118-130. - EDN NQKQGI.

2. Kvitko, A. V. Features of the introduction of renewable energy sources into the energy system / A. V. Kvitko, A. D. Sidorenko // Theory and practice of financial and economic activities of enterprises in various industries. Science and society: current problems and solutions: Collection of conference proceedings: III National Scientific and Practical Conference; National Scientific and Practical Conference, Kerch, October 10-29, 2021. – Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2021. – P. 452-455. – EDN XHEXPT.

3. Features of the topology of neon™ inverter converters and methods of their control / O. M.Gladyshev, E. I. Medvedev, I. M. Trofimov [et al.] // Intelligent electrical engineering. – 2022. – No. 1(17). – P. 61-76. – DOI 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_61. – EDN IMRNER.

4. Gerasimov A.S. Requirements for wind and solar power plants operating as part of the power system // JSC "Scientific and Technical Center of the Unified Energy System"; August 02, 2017, Moscow, 2017.

5. Ibrahim, M. Control strategies for the electrical complex of high-voltage direct current power transmission lines / M. Ibrahim, V. I. Pantelev // Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology. - 2023. - Vol. 16, No. 2. - Pp. 120-137. - EDN ZAQIRS.

6. Ilyushin P.V., Loskutov A.A., Kulikov A.L. Control system for electric energy storage devices to expand the range of permissible modes of generating units of distributed generation sources during voltage dips. Russian Federation Patent for Invention No. 2721477. 05/19/2020. Bulletin. № 14. Available from: [https://patents.s3.yandex.net/RU2721477C1\\_20200519.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2721477C1_20200519.pdf) The link is active on 02/09/2025.

7. Turitsyn K., Sulc P., Backhaus S., Chertkov M. Local Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators: 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications; 4-6 Oct 2010; Gaithersburg, Maryland, USA; 2020. pp. 79-84.

8. Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Tomskikh N.V., et al. Control of power flows in local networks // News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY. 2023. Vol. 25 No. 5. pp. 74-82.

9. Marchenko, A. I. Investigation of the Parallel Operation Stability of Minigrid Based on Small Generation with an External Electrical Network of the Power System / A. I. Marchenko, V. V. Denisov, I. S. Murashkina // Proceedings of the 2021 15th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2021: 15, Novosibirsk, November 19–21, 2021. – Novosibirsk, 2021. – P. 120-124. – DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647483. – EDN RWIVVX.

10. Smolentsev N.I., Chetoshnikova L.M., Tomskikh N.V. Two-way control of energy flows in distributed electric networks ENERNET // Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "Modern problems of telecommunications"; April 19-20, 2023. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2023. Pp.136-143.

11. Analysis of access to the electricity transmission network using information technologies in some countries / G. Azieva, S. Kerimkhulle, U. Turusbekova [et al.] // E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, February 17-19, 2021. – Chelyabinsk, 2021. – DOI 10.1051/e3sconf/202125811003. – EDN LBIEVU.

12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Voltage regulation in a DC and AC microgrid based on energy routers and energy storage devices // Intelligent Electrical Engineering. 2023. Vol. 21 No.Pp. 62-84.

13. Golubchik, T. V. Distributed generation in small-scale power generation. Search for energy-efficient solutions by automation of complex power systems / T. V. Golubchik, A. S. Kulikov, D. Y. Taratutin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1159, No. 1. P. 012041. – DOI 10.1088/1757-899x/1159/1/012041. – EDN QHOGMB.

14. Dharmawardena, H.; Kumar Venayagamoorthy, G. Distributed Volt-Var Curve Optimization Using a Cellular Computational Network Representation of an Electric Power Distribution System. Energies 2022, 15, 4438. <https://doi.org/10.3390/en15124438>.

15. Energy management system for hybrid PEMFC-battery power source for stationary consumers / Loskutov, A. Dar'enkov, I. Lipuzhin [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. Vol. 55. – P. 1109-1121. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2023.11.275. – EDN WOWUQA.

#### Authors of the publication

**Larisa M. Chetoshnikova** – South Ural State University <https://orcid.org/0000-0003-2235-3993>. [chlm56@mail.ru](mailto:chlm56@mail.ru).

**Nikolay I. Smolentsev** – Siberian State University of Telecommunications and Informatics. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5775-2903>. Email: [uralcm@mail.ru](mailto:uralcm@mail.ru).

**Anna V. Polyanskaya** – Siberian State University of Telecommunications and Informatics Email: [pav@sibguti.ru](mailto:pav@sibguti.ru).

Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика

**Получено** 08.02.2025 г.

**Отредактировано** 11.04.2025 г.

**Принято** 24.04.2025 г.



## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ЗАРЯДОМ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Шамарова Н.А.<sup>1,3</sup>, Шушпанов И.Н.<sup>1</sup>, Федосов Д.С.<sup>1</sup>, Суслов К.В.<sup>1,2</sup>, Батухтин А.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Московский  
энергетический институт», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия  
k15@istu.edu

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке метода моделирования графика нагрузки электрозаправочных станций (ЭЗС) с учетом неопределенности параметров нагрузки, включая характер интенсивности подключения электромобилей (ЭМ) в течение заданного периода. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы моделирования графика нагрузки ЭЗС с учетом неопределенности. Разработать метод моделирования графика нагрузки ЭЗС, учитывающий несколько случайных составляющих. Провести моделирование графика нагрузки, учитывающей характер интенсивности начала времени зарядки на основе эмпирических данных. Провести оценку неопределенности нагрузки ЭЗС, сходимости модели и произвести анализ ее чувствительности на изменение входных параметров. МЕТОДЫ. Проанализированы существующие методы моделирования графика нагрузки ЭЗС. Для построения математической модели графика нагрузки ЭЗС использован метод Монте-Карло, реализованный в среде MatLab®. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье проведена обработка экспериментальных данных по количеству подключаемых ЭМ, на основе которых получен усредненный суточный график нагрузки ЭЗС. Применен комбинированный закон распределения вероятностей, соответствующий эмпирическим данным и отражающий интенсивность подключения ЭМ. Разработана параметрическая модель для формирования временного профиля нагрузки ЭЗС, учитывающая ключевые факторы неопределенности нагрузки: времена начала зарядки; потребляемую мощность ЭМ; продолжительность зарядки и количество ЭМ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложены метод и модель графика нагрузки ЭЗС, позволяющие формировать временной профиль мощности при наличии неопределенности исходных данных. Модель графика нагрузки ЭЗС может быть использована для планирования размещения ЭЗС, оценки небаланса электроэнергии и выбора параметров накопителей электроэнергии для интеграции ЭЗС и обеспечения их стабильной работы в распределительных электрических сетях.

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети; электрозаправочные станции; электромобили; неопределенность графика нагрузки; метод Монте-Карло; модели графика нагрузки ЭЗС.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива», соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.).

**Для цитирования:** Шамарова Н.А. Шушпанов И.Н., Федосов Д.С., Суслов К.В., Батухтин А.Г. Оценка неопределенности электрических нагрузок, обусловленных зарядом электромобилей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 147 -161. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-147-161.

## ESTIMATION OF UNCERTAINTY IN ELECTRICAL LOADS DUE TO ELECTRIC VEHICLE CHARGING

Shamarova N.A.<sup>1,3</sup>, Shushpanov I.N.<sup>1</sup>, Fedosov D.S.<sup>1</sup>, Suslov K.V.,  
<sup>1,2</sup> Batukhtin A.G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Transbaikal State University, Chita, Russia

k15@istu.edu

**Abstract:** *RELEVANCE.* This study addresses the need to develop a method for modeling the load profile of electric vehicle charging stations (EVCS) while accounting for parameter uncertainties, including the stochastic intensity of electric vehicle (EV) connections over a given period. *THE PURPOSE.* Analyze challenges in modeling EVCS load profiles under uncertainty. Develop a simulation method for EVCS load profiles that incorporates multiple stochastic components. Simulate load profiles reflecting the intensity of charging start times using empirical data. Evaluate EVCS load uncertainty, model convergence, and sensitivity to input parameter variations. *METHODS.* The study analyzes existing methods for modeling EVCS load profiles. A Monte Carlo method, implemented in MatLab®, was used to construct a mathematical model of the EVCS load profile. *RESULTS.* Experimental data on the number of connected EVs are processed to derive an average daily EVCS load profile. A combined probability distribution law, aligned with empirical data and reflecting EV connection intensity, is applied. A parametric model is developed to generate the temporal load profile of EVCS, incorporating key uncertainty factors: charging start time, EV power consumption, charging duration, and the number of EVs. *CONCLUSIONS.* A method and model for simulating EVCS load profiles are proposed, enabling the generation of temporal power profiles under input data uncertainty. The model can be applied to plan EVCS placement, evaluate power imbalance and select parameters for energy storage systems to integrate EVCS and ensure their stable operation in distribution grids.

**Keywords:** *electric distribution grids; electric charging stations; electric vehicles; load schedule uncertainty; Monte Carlo method; electric vehicle charging station load profile models.*

**Acknowledgements:** *the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № 123102000012-2 «Comprehensive study of aerodynamic characteristics of plasma systems of thermochemical fuel preparation», agreement № 075-03-2023-028/1 of 05.10.2023).*

**For citation:** Shamarova N.A., Shushpanov I.N., Fedosov D.S., Suslov K.V., Batukhtin A.G. Estimation of uncertainty in electrical loads due to electric vehicle charging. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 147-161. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-147-161.

### **Введение (Introduction)**

В связи с развитием распределительных электрических сетей (РЭС) в их структуре появляется все больше элементов неопределенности, таких как генерация от возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) и нагрузка от ЭМ.

Мировой рекорд продаж ЭМ достиг 17,1 млн единиц в 2024 году, что на 25% больше, чем в предыдущем году [1]. Согласно данным агентства «Автостат» [1], на июнь 2024 года в России насчитывалось 7410 публичных зарядных станций. Из них 65,5% – это медленные ЭЗС (до 50 кВт), а 34,5% – быстрые (50 кВт и выше). На январь 2025 года эти станции обслуживали 59 тыс. ЭМ. Распоряжением Правительства РФ от 23 августа 2021 г. № 2290-р утверждена концепция развития производства и использования электротранспорта в России до 2030 года. Согласно данной концепции, сценарий развития предполагает увеличение количества ЭЗС, по минимальной оценке, до 72 тыс. штук, из которых 28 тыс. – это быстрые ЭЗС. В расчет принимались медленные зарядные станции мощностью 44 кВт/ч и быстрые ЭЗС мощностью 150 кВт/ч. В Москве действуют 3 тыс. ЭЗС, и их количество к 2030 году планируется увеличить до 30 тыс. [2].

Стремительный рост электротранспорта требует дальнейшего развития инфраструктуры зарядных станций. Это ухудшает функционирование уже перегруженных электрических сетей, снижая их стабильность и надежность.

Согласно наблюдениям, потребность в зарядке электротранспорта чаще всего возникает в часы наибольшей нагрузки на энергосистему. Это приводит к тому, что станции быстрой зарядки создают дополнительную нагрузку. В свою очередь, это

увеличивает пиковое энергопотребление, сокращает резервные мощности, ухудшает качество электроэнергии и повышает риски возникновения повреждений в сети. Проблемы подходов к развитию инфраструктуры зарядных станций исследовались в работах, включающих анализ различных мер поддержки и технологии мобильных зарядных станций [3,4].

Достаточно много работ посвящено исследованиям методов моделирования электрических сетей с учётом ЭЭС. Эти методы используются для анализа воздействия таких нагрузок на стабильность и качество электроснабжения, а также для поиска путей минимизации их негативного влияния. В работе [5] показано влияние размещения зарядных станций на три индекса надёжности: SAIFI, SAIDI и CAIDI. Индексы надёжности ухудшились из-за увеличения нагрузки от зарядки, однако остались ниже критических значений. Результаты исследований [6, 7] демонстрируют, что повышенный спрос на электроэнергию, вызванный электротранспортом в пиковые часы, приводит к недоотпуску электроэнергии. В работе [8] изучено влияние нагрузки от ЭМ на распределительную сеть и выявлена одна из серьёзных проблем – недопустимое снижение уровней напряжения в узлах нагрузки. Вопросами совершенствования нормативной базы, регламентирующей порядок определения расчетной нагрузки общественных зданий при интеграции в электроустановки жилых и общественных зданий зарядной инфраструктуры для электромобилей, рассматривались в работе [9]. Выбор параметров электрочарядных станций, располагаемых на территории микрорайонов в работе [10] исследовался с учетом пропускной способностью систем электроснабжения и суточного изменения нагрузки многоквартирных домов.

Неопределенность нагрузки заслуживает отдельного изучения, поскольку большинство существующих исследований рассматривают неопределенности только в отношении ВИЭ. При этом очевидно, что нагрузка ЭЭС также является стохастической, поскольку поведение ЭМ при зарядке является неопределенным и может меняться в зависимости от различных параметров, таких как количество заряжаемых автомобилей, емкость и степень заряда батареи, а также продолжительность зарядки. Кроме того, количество используемых населением ЭМ постоянно меняется, что приводит к колебаниям общего спроса на зарядку и к изменениям профилей нагрузки. Эти неопределенности затрудняют точное прогнозирование и планирование нагрузки от ЭМ, что вызывает необходимость использования методов стохастического моделирования для учета присущей нагрузке ЭМ изменчивости и неопределенности.

Цель работы заключается в исследовании проблемы моделирования графика нагрузки ЭЭС с учетом неопределенности. Необходимо разработать метод моделирования графика нагрузки ЭЭС, учитывающий несколько случайных составляющих, провести оценку неопределенности нагрузки ЭЭС, сходимости модели и выполнить анализ ее чувствительности к изменению входных параметров.

Научная новизна исследования состоит в разработке универсальной параметрической модели ЭЭС, учитывающей неопределенности параметров нагрузки.

Практическая значимость заключается в том, что универсальная модель позволит объединить нагрузки ЭМ в виде единого графика случайно меняющейся мощности с независимыми параметрами случайных величин, полученных из обработки экспериментальных данных.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

В литературе представлены различные методы моделирования применительно к нагрузке и генерации ВИЭ, которые можно разделить на два класса: методы детерминированного моделирования и методы стохастического моделирования. Стохастические математические модели отличаются от детерминированных наличием параметров случайных величин, которые учитывают их вероятностный характер. Большинство методов оценки мощности генерации и нагрузки базируются на детерминированных подходах, которые не учитывают неопределённости в прогнозировании временных рядов. Например, широкое применение нашли методы прогнозирования, основанные на искусственном интеллекте. Однако такие методы ограничены обучающей выборкой данных и не учитывают возможные сценарии изменения выходных параметров модели. Введение количественной оценки параметрических неопределённости могло бы значительно углубить понимание и улучшить многокритериальный анализ для принятия решений. В настоящее время расхождения между результатами детерминированных и стохастических моделей могут достигать 25% [11]. Тем не менее некоторые архитектуры нейронных сетей созданы специально для работы со стохастическими процессами, например, байесовские

нейронные сети [12], а также генеративно-состязательные сети, которые генерируют данные, имитирующие случайные процессы [13]. Применительно к моделированию нагрузки ЭЭС в работе [14] используется метод, основанный на комбинации многопараметрической модели коррекции остатков с использованием нейронной сети с учетом температуры и цены на электроэнергию. В работе [15] использовался метод глубокого машинного обучения для прогнозирования нагрузки от ЭЭС, однако, как отмечается авторами, использовались ограниченные данные только одной зарядной станции для ЭМ, что не позволило учитывать больше факторов, влияющих на обучение модели. В исследовании [16] для краткосрочного прогнозирования нагрузки ЭЭС применяется один из подходов в машинном обучении и анализе данных – метод ансамблевого прогнозирования, который объединяет несколько моделей для повышения точности и устойчивости прогнозов.

К методам, учитывающим неопределенность, относят вероятностные методы, в том числе метод стохастического моделирования Монте-Карло, которые представляют неопределенность с точки зрения плотности распределения вероятности (ПРВ) [17]. Метод Монте-Карло (ММК) предполагает создание случайных выборок входных переменных и многократное моделирование поведения системы для получения распределения возможных результатов. Это позволяет лицам, принимающим решения, оценивать вероятность различных сценариев и формировать управляющие воздействия на основе вероятности достижения желаемых результатов. ММК может быть полностью имитационным или гибридным, учитывающим статистическую выборку данных. Для создания экспериментальных сценариев нагрузки ЭМ широко применяются методы, основанные на моделировании Монте-Карло [8,18]. В исследовании [8] предложен подход к моделированию стохастической нагрузки от ЭМ в распределительной сети с использованием ММК, а также его модификации – метода бутстрэпа. В работе [18] предлагается вероятностная модель узлового спроса на зарядку с использованием пространственно-временной модели динамики движущихся ЭМ, основанная на теории графов и процессе принятия решений Маркова. При этом узловые требования к зарядке образуются из вероятностных параметров зарядки.

В исследованиях также используются различные методы моделирования неопределенности нагрузки ЭЭС, такие как байесовский подход [19], метод авторегрессионного скользящего среднего (ARIMA) [20]. Исследование [19] направлено на прогнозирование общего количества ЭМ, начинающих зарядку в течение часа в рамках парка зарядных устройств региона. Для этого предлагается байесовская иерархическая модель, которая описывает прибытие ЭМ как стохастический процесс. Данные общего числа прибывающих ЭМ на зарядные станции демонстрируют бимодальное распределение, которое отражает прибытие в утренние часы и после обеда. Предложенная модель включает два равномерных гипер-априорных распределения. Наконец, апостериорное распределение моделируется на основе априорного распределения и функции правдоподобия для получения прогнозов с использованием метода Монте-Карло с цепями Маркова. Однако в работе не рассматривается моделирование графика нагрузки ЭЭС, включающее другие вероятностные характеристики зарядки. В работе [20] выбрана модель ARIMA для анализа стационарного временного ряда и прогнозирования нагрузки ЭЭС. Модель состоит из двух частей: авторегрессионной (AR) части и части скользящего среднего (MA). Однако модель не адаптируется автоматически к изменениям в данных, например, к изменчивости количества ЭМ, емкости и степени заряда батарей. Для учета новых параметров или изменений в структуре данных требуется повторное обучение модели.

Кроме этого, существуют методы имитационного моделирования на основе мульти-агентного подхода [21], которые строятся на поведенческих факторах пользователей ЭМ, таких как предпочтения пользователей, характер поездок и наличие зарядной инфраструктуры. В работе [22] для учета неопределенности и дискретных переменных ЭМ используется непараметрический метод бутстрэп в сочетании с моделью оптимизации на основе генетического алгоритма.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

В данной статье неопределенность графика нагрузки ЭЭС оценивается с помощью параметрической модели для вероятностного моделирования с применением ММК. Методология включает в себя создание неопределенностей нагрузки с использованием функций распределения вероятностей.

Для апробации метода рассмотрим ситуацию, в которой необходимо определить количество зарядных станций так, чтобы каждый ЭМ мог подключиться без ожидания.

Также требуется получить суммарный график потребления электроэнергии для оценки возможности эксплуатации такой нагрузки в существующей электрической сети.

Проанализировав данные о количестве ЭМ, мы установили, что зарядка требуется для 1000 машин в течение недели, при этом средняя мощность одного ЭМ составляет 25 кВт. Зарядка будет осуществляться в одной точке, то есть на одной ЭЗС. В нашем случае ЭЗС расположена на оживленной трассе около крупного мегаполиса. Для данных условий необходимо рассчитать потребляемую мощность ЭЗС и количество зарядных постов.

В работе ММК используется для создания профиля нагрузки нескольких случайных составляющих и расчета выходных переменных (время начала зарядки ЭМ, мощность, потребляемая одним ЭМ, продолжительность зарядки ЭМ). Алгоритм модели представлен на рисунке 1.

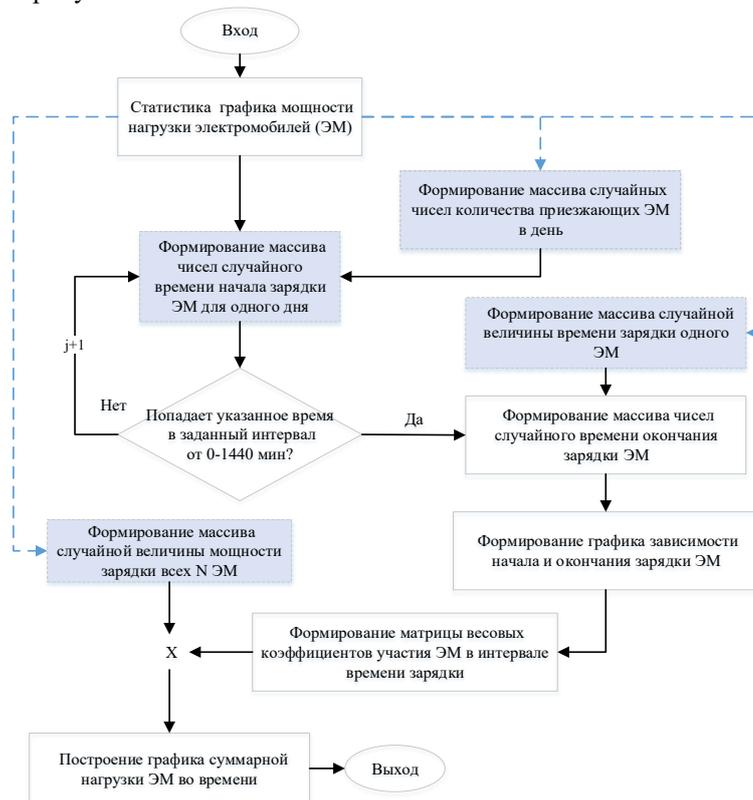


Рис. 1 Алгоритм моделирования графика нагрузки ЭЗС *Fig. 1 The algorithm for simulating the load profile of EVCS*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Моделирование интенсивности количества подключения ЭМ осуществляется с помощью статистических данных за ограниченный период времени (рис. 2). На основе усредненного суточного графика нагрузки (рис. 3), полученного из статистической выборки г. Лос-Анджелес, необходимо сформировать массив случайного подключения ЭМ на основе соответствующего закона распределения вероятности (ЗРВ). Для этого используется сложный ЗРВ путем совмещения двух и более ЗРВ для описания случайного характера интенсивности подключений. Например, на рис. 3 график нагрузки имеет два выраженных пика: ночной и вечерний. Для учета изменения суточного изменения вечернего пика используется ЗРВ Вейбулла и нормальное распределение для описания ночного пика нагрузки. Комбинация весовых коэффициентов позволяет учитывать изменения вероятности вечернего и ночного пика нагрузки и отражена в формуле (1):

$$T_{нач} = aF_1(x) + bF_2(x) \quad (1)$$

где  $T_{нач}$  – массив времени начала зарядки,  $F(x_1)$  – функция распределения Вейбулла,  $F(x_2)$  – функция нормального распределения,  $a$ ,  $b$  – весовые коэффициенты для корректировки величины максимумов нагрузки.

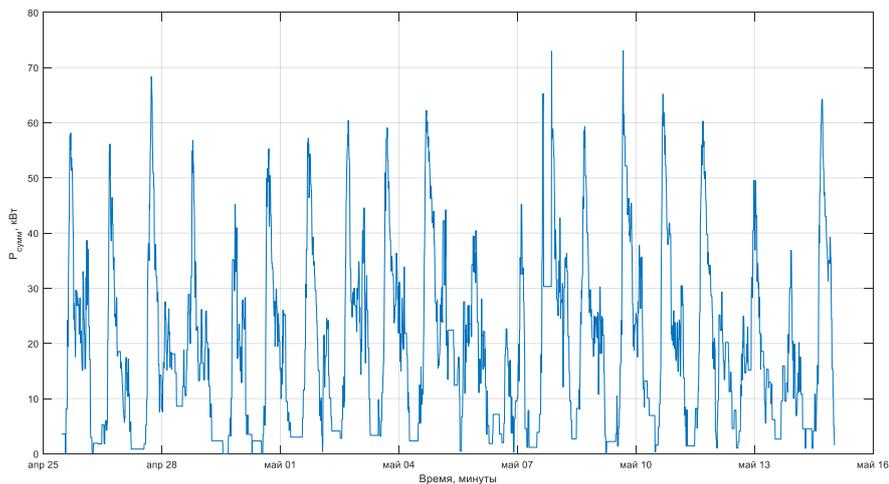


Рис. 2 Эмпирический график интенсивности мощности подключений ЭМ за месяц *Fig. 2 The empirical graph of the power intensity of EV connections over a month*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

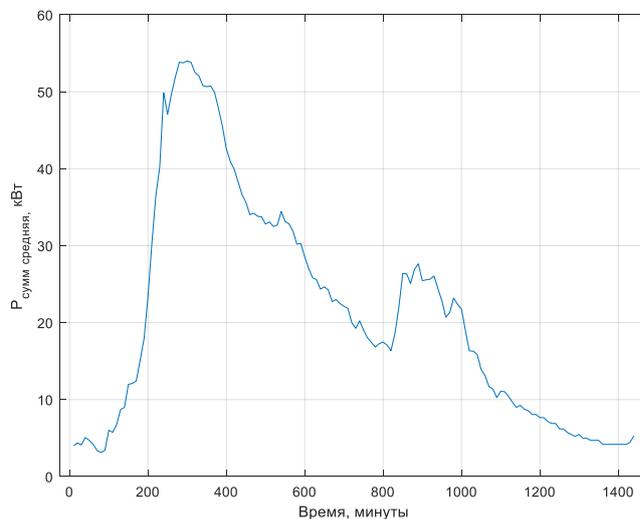


Рис. 3 Усреднённый суточный эмпирический график нагрузки ЭЗС *Fig. 3 The average daily empirical load graph of the EVCS*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Задаются входные данные для моделирования: период моделирования, например, неделя; количество машин в интервале моделирования, а также параметры случайных величин.

Далее генерируется массив случайного времени начала зарядки с помощью выбранных функций распределения вероятностей. Также формируется массив случайных целых чисел, соответствующих количеству машин, приезжающих на зарядку каждый день. Количество подчиняется нормальному ЗРВ. Аналогично формируются случайные значения мощностей нагрузок для всех  $N$  ЭМ. В результате будет получен график мощности, усреднённой за десятиминутные интервалы, представленный на рис. 4.

Для определения времени завершения зарядки используется метод стохастического моделирования на основе гауссовского распределения. Расчет выполняется путем добавления к начальному моменту зарядки двух компонентов: среднего значения длительности процесса ( $\mu = T_{зар}$ ) и случайной временной вариации. Величина отклонения задается через параметр  $\sigma$ , вычисляемый как треть от целевого диапазона возможных изменений, что обеспечивает симметричное распределение положительных и отрицательных временных коррекций относительно математического ожидания по формуле (2). Указанный выше параметр можно условно считать диапазоном изменения вероятного времени зарядки согласно правилу «трёх сигм»

$$T_{окон} = T_{нач} + \mu \pm \Delta t \quad (2)$$

где  $T_{окон}$  – время окончания зарядки,  $T_{нач}$  – время начала зарядки,  $\mu$  – математическое ожидание продолжительности зарядки ( $T_{зар}$ ),  $\Delta t$  – случайное приращение времени, распределённое по нормальному закону с нулевым средним значением и среднеквадратичным отклонением, равным  $\sigma$ .

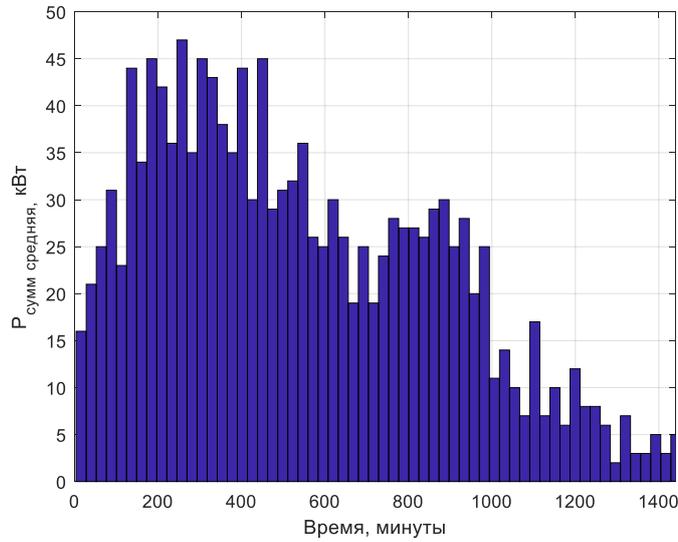


Рис. 4 График случайных подключений мощности ЭЗС с помощью распределения Вейбулла и нормального распределения *Fig. 4 The graph of random power connections for the EVCS using the Weibull distribution and the normal distribution*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сформированный график зависимости времен начала и окончания от порядкового номера приехавшего на зарядку ЭМ представлен на рисунке 5.

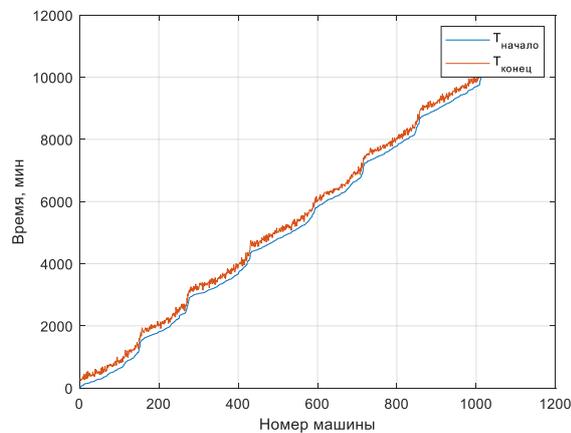


Рис. 5 График времен начала и окончания зарядки *Fig. 5 The graph of the start and end times of charging*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На следующем этапе строится матрица активности, определяющая вклад  $k$ -го ЭМ в суммарную нагрузку. Создается бинарная матрица  $A$  размером  $T \times N$ , где строки соответствуют дискретным временным интервалам моделирования. Для каждого ЭМ последовательно анализируются все временные шаги ( $i$ ) от первого до  $T$ -го. Если текущий момент времени находится в пределах периода зарядки данного транспортного средства (т.е. превышает время начала и меньше времени завершения), элемент матрицы  $A[i, k]$  принимает значение 1, в остальных случаях – 0 по формуле (3). Алгоритм повторяется для всех  $N$  ЭМ, формируя полную матрицу взаимодействий

$$\begin{cases} A(i, k) = 1, & \text{если } T(i) \in (T_{нач}^k) \\ A(i, k) = 0, & \text{если } T(i) \notin (T_{окон}^k) \end{cases} \quad (3)$$

где  $k$  – бинарная переменная (1 означает принадлежность ЭМ к текущему временному интервалу нагрузки),  $A$  – матрица размерностью  $T \times N$ , где  $T$  – число временных интервалов моделирования, а  $N$  – общее количество ЭМ.

Для расчета суммарного профиля нагрузки выполняется поэлементное умножение матрицы участия  $A$  на вектор мощностей ЭМ  $P_k$  с последующим агрегированием результатов по столбцам:

$$P_{\sum(i)} = \sum_{k=1}^N A(i, k) \cdot P_k \quad (4)$$

где  $A$  – матрица участия размерностью  $T \times N$ ;  $P_k$  – вектор потребляемой мощности каждого ЭМ.

После этого просуммированы все ненулевые (участвующее в формировании общего профиля зарядки) мощности в данный момент времени. Получившийся недельный график нагрузки представлен на рис. 6, 7.

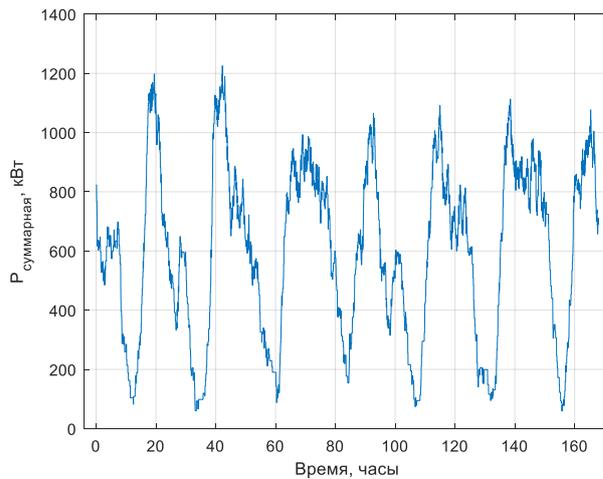


Рис. 6 График суммарной нагрузки ЭЭС в течение недели *Fig. 6 The graph of the total load of the EVCS over the course of a week*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

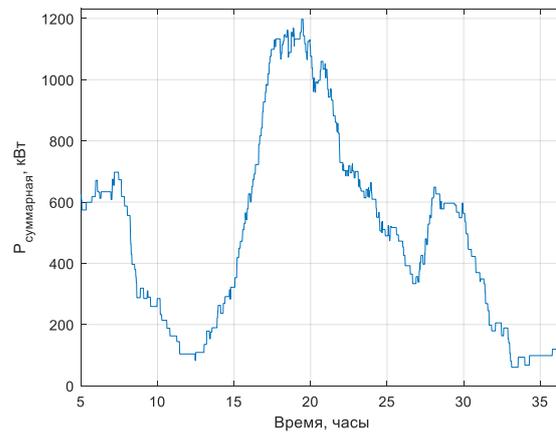


Рис. 7 Суточный график суммарной нагрузки ЭЭС *Fig. 7 The daily graph of the total load of the EVCS*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На рисунке 8 представлено количество подключений ЭМ во времени, полученных при моделировании.

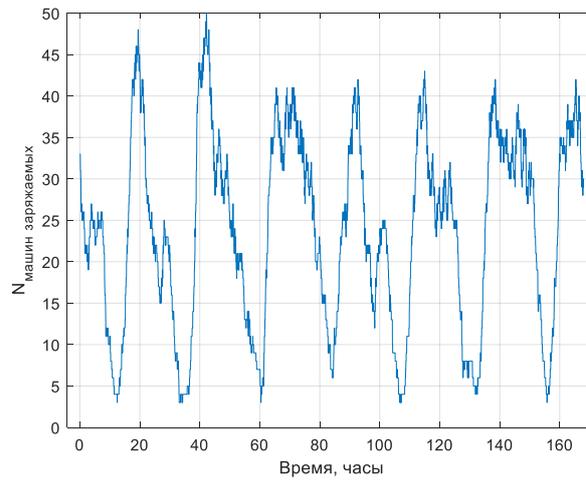


Рис. 8 График количества одновременно заряжаемых машин во времени *Fig. 8 The graph of the number of simultaneously charging vehicles over time*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Из графика видно, что суточное максимальное количество одновременно заряжаемых автомобилей составляет 40-55 машин при заданном количестве подключаемых ЭМ 1000 в течение недели. Таким образом, с помощью моделирования, выполненного предлагаемым методом, можно определить диапазон количества одновременно заряжаемых ЭМ и количество необходимых зарядных портов для покрытия спроса. Также по результатам моделирования можно оценить диапазон требуемой мощности ЭЭС.

Для проверки сходимости модели, формирующей график нагрузки ЭЭС, задается количество итераций  $N$  и инициализируются массивы для хранения результатов:

$$R \in R^{M \times T}, M(i) \in R^T, V(i) \in R^T \quad (5)$$

где  $M$  – количество итераций,  $T$  – количество временных точек,  $R$  – матрица результатов,  $M(i)$  – вектор средних значений на итерации  $i$ ,  $V(i)$  – вектор дисперсий на итерации  $i$ .

Для моделирования итерации каждый раз запускается модель ЭЭС. Инициализируется массив  $R$  для сохранения всех итераций модели графика нагрузки ЭЭС.

$$R(i,:) = P_{сумм}^T \quad (6)$$

где  $P_{сумм}$  – временной профиль суммарной нагрузки ЭЭС для  $i$ -й итерации по ММК.

Далее вычисляются средние значения и дисперсии для всех предыдущих итераций массива  $R$ :

$$M(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i R(j,:) \quad (7)$$

$$V(i) = \frac{1}{i-1} \sum_{j=1}^i (R(j,:) - M(i))^2 \quad (8)$$

После завершения итераций вычисляется среднее значение по всем результатам

$$M_{final} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R(j,:) \quad (9)$$

и определяется стандартное отклонение по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R(i,:) - M_{final})^2} \quad (10)$$

В рамках исследования проведено 3000 вычислительных циклов стохастического моделирования профиля нагрузки на основе ММК. Анализ выявил, что после  $10^3$  итераций среднее значение и дисперсия вероятностных характеристик стабилизируются (рис. 9), подтверждая сходимость модели.

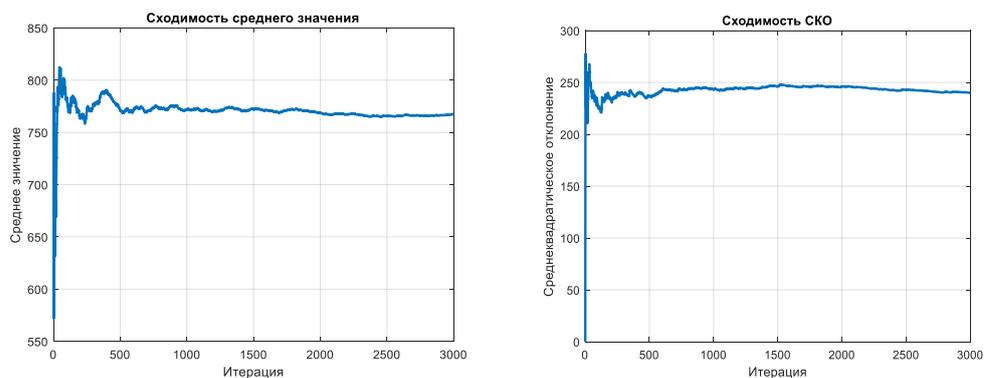


Рис.9 Сходимость среднего значения и Fig. 9 Convergence of the mean value and the среднеквадратичного отклонения standard deviation

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчетов, включая усредненные значения нагрузок и их стандартные отклонения (рис. 10), продемонстрировали вариативность потребления ЭЭС. Эти данные позволяют количественно оценить влияние стохастических колебаний нагрузки ЭЭС.

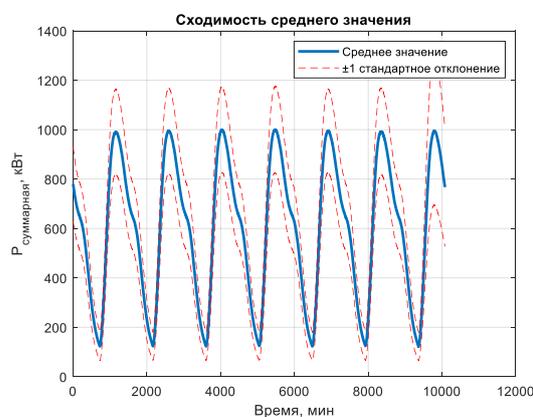


Рис. 10 Недельный график нагрузки ЭЭС со Fig. 10 The weekly load graph of the EVCS with средним значением и коридором the mean value and the confidence interval range доверительного интервала

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С целью анализа чувствительности произведено моделирование вариантов изменения входных параметров модели (таблица 1), а именно: изменение среднеквадратичного отклонения мощности зарядки ЭМ (вариант 2) и изменение математического ожидания продолжительности зарядки (вариант 3).

Таблица 1  
Table 1

Входные параметры случайной величины  
Random variable input parameters

№	Вероятностные характеристики мощности зарядки	Вероятностные характеристики времени зарядки
1 (исходный)	$\mu = 25; \sigma = 20$	$\mu = 4; \sigma = 3$
2	$\mu = 25; \sigma = 35$	$\mu = 4; \sigma = 3$
3	$\mu = 25; \sigma = 20$	$\mu = 6; \sigma = 3$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С применением ММК получено изменение среднеквадратичного отклонения случайной величины мощности зарядки при неизменном математическом ожидании (вариант 2). Среднее значение и дисперсия ключевых показателей представлены на рис. 11.

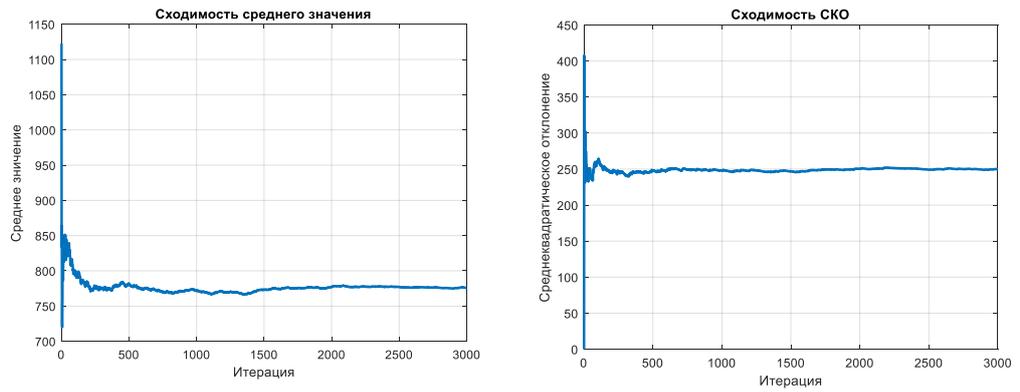


Рис.11 Сходимость среднего значения и среднеквадратичного отклонения (Вариант 2) *Fig. 11 Convergence of the mean value and the standard deviation (Option 2)*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

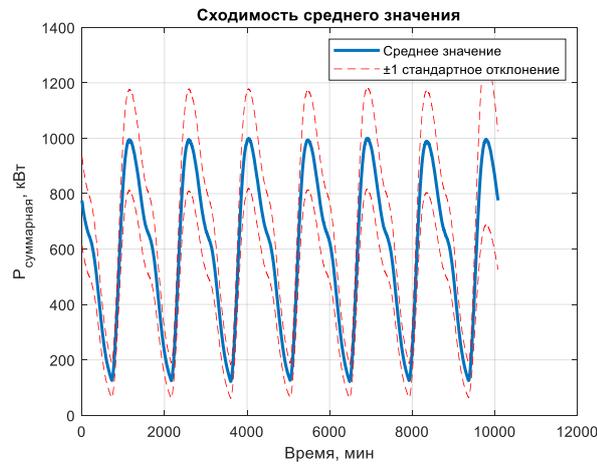


Рис. 12 Недельный график со средним значением и коридором доверительного интервала (Вариант 2) *Fig. 12 Weekly graph with the mean value and the confidence interval range (Option 2)*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рассмотрен вариант изменения параметров случайных величин времени зарядки и математического ожидания (вариант 3). Среднее значение и дисперсия показателей сходимости представлены на рис. 13.

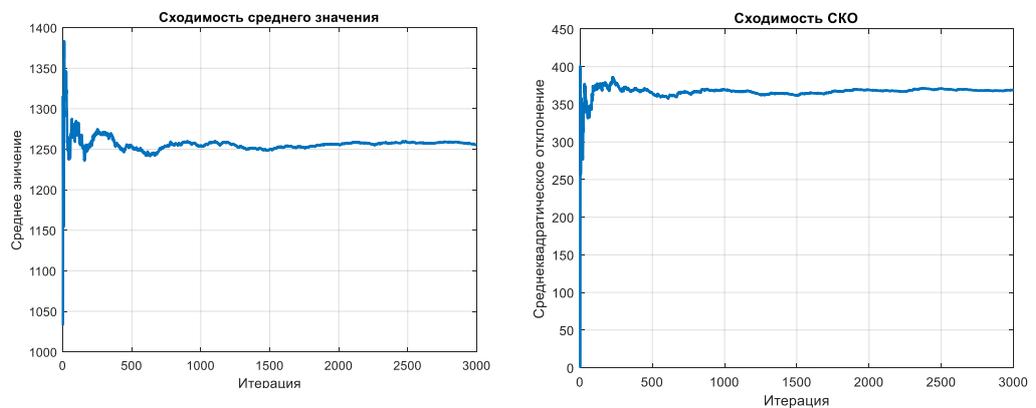


Рис. 13 Сходимость среднего значения и среднеквадратичного отклонения (Вариант 3) *Fig. 13 Weekly graph with the mean value and the confidence interval range (Option 3)*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

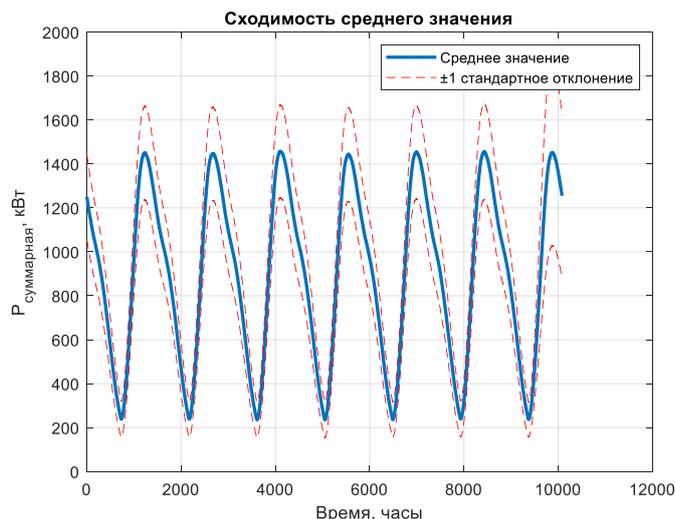


Рис. 14 Недельный график со средним значением и коридором доверительного интервала (Вариант 3) *Fig. 14 Weekly graph with the mean value and the confidence interval range (Option 3)*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

При изменении одного из параметров случайной величины, такого как среднеквадратичное отклонение мощности ( $\sigma = 20 \rightarrow \sigma = 35$ ) в Варианте 2 из таблицы 1, не наблюдается заметного влияния на усреднённые значения нагрузок и их стандартные отклонения (таблица 2). При изменении математического ожидания времени зарядки ( $\mu = 4 \rightarrow \mu = 6$ ) в Варианте 3 из таблицы 1 усреднённые значения нагрузок ЭЭС увеличились на 45%

Таблица 2  
*Table 2*

Распределение среднего значения недельного графика нагрузки ЭЭС по максимальному суточному пику

Distribution of the average value of the weekly EES load schedule by the maximum daily peak

Описание	1 день	2 день	3 день	4 день	5 день	6 день	7 день
Исходный набор данных	990 кВт	995 кВт	998 кВт	999 кВт	995 кВт	992 кВт	994 кВт
Изменение среднеквадратичного отклонения мощности ЭМ	994 кВт	994 кВт	998 кВт	993 кВт	999 кВт	988 кВт	994 кВт
Изменение математического ожидания времени зарядки	1450 кВт	1446 кВт	1457 кВт	1443 кВт	1453 кВт	1455 кВт	1451 кВт

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Также среднее значение и дисперсия ключевых показателей стабилизируются примерно на  $10^3$  итерации (Вариант 2 и 3), подтверждая сходимость модели.

Таким образом, интегральные параметры, полученные в результате моделирования, не чувствительны к изменениям такого входного параметра, как среднеквадратичное отклонение мощности зарядки ЭМ. Однако изменение математического ожидания времени зарядки приводит к увеличению пиковой мощности графика нагрузки с 999 кВт до 1457 кВт.

### Выводы (Conclusions)

В работе представлен подход к моделированию ЭЭС на основе ММК, в котором используются распределения вероятностей для представления неопределенности различных параметров случайных величин профиля нагрузки ЭЭС, таких как время начала зарядки, потребляемая мощность ЭМ, продолжительность зарядки и количество ЭМ. В работе обработаны экспериментальные данные для получения усредненного суточного графика нагрузки. Для описания характера графика нагрузки ЭЭС, имеющего два пика нагрузки, был подобран комбинированный закон распределения, сочетающий два ЗРВ, которые наиболее полно повторяют эмпирические данные. Это позволило моделировать характер

интенсивности подключения ЭМ во времени. Проведена оценка сходимости модели, её чувствительность к изменению входных параметров.

Метод моделирования графика нагрузки ЭЭС позволяет при каждом запуске моделирования использовать различные наборы значений, взятых из этих распределений, что даёт возможность охватить широкий спектр вероятных сценариев. Моделирование осуществляется с учетом интенсивности подключения ЭМ во времени, что подходит для проведения дальнейшего анализа профиля нагрузки с целью решения задач оптимизации надежности и качества электроснабжения в РЭС.

### Литература

1. Аналитическое агентство "АВТОСТАТ" URL: <https://www.autostat.ru/> (дата обращения 20.10.2024)
2. РБК URL: <https://www.rbc.ru/> (дата обращения 20.10.2024)
3. Валеева Ю. С. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории / Ю. С. Валеева, М. В. Калинина, Т. Г. Зорина, И. Г. Ахметова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 1(53). – С. 155-172. – EDN UCKMFG.
4. Сафин А. Р. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.
5. Deb, S. Charging station placement for electric vehicles: A case study of Guwahati city, India/ S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, P. Mahanta//IEEE access. – 2019. – vol. 7. – pp. 100270-100282.
6. Karmaker, A. K., Roy S., Ahmed M. R. Analysis of the impact of electric vehicle charging station on power quality issues/ A. K. Karmaker, S. Roy, M. R. Ahmed //2019 international conference on electrical, computer and communication engineering (ECCE). – IEEE, 2019. – pp. 1-6.
7. Ahmed, A. A. NEPLAN-Based Analysis of Impacts of Electric Vehicle Charging Strategies on Power Distribution System/ A. A. Ahmed, M. A. Abdullah, M. Mansor, M. B. Marsadek, Y. J. Ying, M. S. Abd Rahman, N. A. Salim //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – vol. 1127. – №. 1. – 012033.
8. Шкитина, Н. Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть/ Н. Шкитина, Д. Акимов //Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – №. S1. – С. 40-45.
9. Солуянов Ю. И. Определение расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки жилых и общественных зданий / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 94-107. – DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-94-107. – EDN XFGOGS.
10. Солуянов Ю. И. Выбор зарядных станций, согласованный с действующими системами электроснабжения многоквартирных домов и образовательных учреждений мегаполиса /, А. И. Федотов, В. И. Солуянов [и др.] // Электричество. – 2025. – № 1. – С. 32-44. – DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. – EDN HOCOCV.
11. Alasseur C. et al. Regression Monte Carlo for microgrid management //ESAIM: proceedings and surveys. – 2019. – Т. 65. – С. 46-67.
12. Jospin L. V. et al. Hands-on Bayesian neural networks—A tutorial for deep learning users //IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2022. – Т. 17. – №. 2. – С. 29-48.
13. Goodfellow I. et al. Generative adversarial networks //Communications of the ACM. – 2020. – Т. 63. – №. 11. – С. 139-144.
14. Feng J. Load forecasting of electric vehicle charging station based on grey theory and neural network/ J. Feng, J. Yang, Y. Li, H. Wang, H. Ji, W. Yang, K. Wang//Energy Reports. – 2021. – vol. 7. – pp. 487-492
15. Zhu J. et al. Short-term load forecasting for electric vehicle charging stations based on deep learning approaches //Applied sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 9. – С. 1723.
16. Buzna L. et al. An ensemble methodology for hierarchical probabilistic electric vehicle load forecasting at regular charging stations //Applied Energy. – 2021. – Т. 283. – С. 116337.
17. Zhang J. et al. Daily electric vehicle charging load profiles considering demographics of vehicle users //Applied Energy. – 2020. – Т. 274. – С. 115063.
18. Tang, D. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles/ D. Tang, P. Wang //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2015. – vol. 7. – №. 2. – pp. 627-636.

19. Palomino A., Parvania M. Bayesian hierarchical model for characterizing electric vehicle charging flexibility //2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). – IEEE, 2020. – С. 1-5.
20. Wang B. et al. EV charging algorithm implementation with user price preference //2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). – IEEE, 2015. – С. 1-5.
21. Воронин, В. А. Мультиагентное моделирование развития электротранспортной инфраструктуры города Кемерово / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 3(78). – С. 10-17. – EDN XVUSOW
22. Mehboob N. et al. Smart operation of electric vehicles with four-quadrant chargers considering uncertainties //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – С. 2999-3009

#### Авторы публикации

**Шамарова Наталия Андреевна** – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3912-1320>. *Email:* [k15@istu.edu](mailto:k15@istu.edu).

**Шушпанов Илья Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-7121-7651> *Email:* [ilis83@mail.ru](mailto:ilis83@mail.ru).

**Федосов Денис Сергеевич** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549> *Email:* [fedosov\\_ds@istu.edu](mailto:fedosov_ds@istu.edu).

**Суслов Константин Витальевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ». *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857> *Email:* [dr.souslov@yandex.ru](mailto:dr.souslov@yandex.ru).

**Батухтин Андрей Геннадьевич**– д-р техн. наук, доцент кафедры энергетики Забайкальского государственного университета. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675> *Email:* [batuhtina\\_ir@mail.ru](mailto:batuhtina_ir@mail.ru).

#### References

1. Analytical agency "AUTOSTAT" URL: <https://www.autostat.ru/> (accessed October 20, 2024)
2. RBC. URL: <https://www.rbc.ru/> (accessed October 20, 2024).
3. Valeeva, Yu. S. Encouraging the development of electric transport as a tool for territorial development/ JS. Valeeva, MV. Kalinina, TG. Zorina, IG. Akhmetova// Bulletin of Kazan State Power Engineering University.– 2022. – vol. 14, № 1(53). – С. 155-172. – EDN UCKMFG.
4. Safin AR. Study of design features of mobile charging units for electric transport for development of sketch design documentation / AR. Safin, IV. Ivshin, AN. Tsvetkov, TI. Petrov, VR. Basenko VA. Manakhov// Power engineering: research, equipment, technology. – 2021. – vol. 23, № 5. – С. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.
5. Deb, S. Charging station placement for electric vehicles: A case study of Guwahati city, India/ S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, P. Mahanta//IEEE access. – 2019. – vol. 7. – pp. 100270-100282.
6. Karmaker, A. K., Roy S., Ahmed M. R. Analysis of the impact of electric vehicle charging station on power quality issues/ A. K. Karmaker, S. Roy, M. R. Ahmed //2019 international conference on electrical, computer and communication engineering (ECCE). – IEEE, 2019. – pp. 1-6.
7. Ahmed, A. A. NEPLAN-Based Analysis of Impacts of Electric Vehicle Charging Strategies on Power Distribution System/ A. A. Ahmed, M. A. Abdullah, M. Mansor, M. B. Marsadek, Y. J. Ying, M. S. Abd Rahman, N. A. Salim //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – vol. 1127. – №. 1. – 012033.
8. Shkitina, N. Analysis of the Impact of Stochastic Electric Vehicle Load on the Distribution Network / N. Shkitina, D. Akimov // Electricity. Transmission and Distribution. – 2021. – No. S1. – Pp. 40-45
9. Soluyanov, Yu.I. Determination of estimated electrical loads of charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of residential and public buildings / Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin, E.A. Fedotov, V.A. Khalturin // Power engineering: research, equipment, technology. 2024;26(6):94-107.– DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-94-107. – EDN XFGOGS.
10. Soluyanov, Yu.I. Selection of charging stations aligned with existing power supply systems for apartment buildings and educational institutions in a metropolis./ A. I.Fedotov, V. I. Soluyanov et al. // Electrichestvo. – 2025. – № 1. – p. 32-44. – DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. – EDN HOCOCV.

11. Alasseur C. et al. Regression Monte Carlo for microgrid management //ESAIM: proceedings and surveys. – 2019. – Т. 65. – С. 46-67.
12. Jospin L. V. et al. Hands-on Bayesian neural networks—A tutorial for deep learning users //IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2022. – Т. 17. – №. 2. – С. 29-48.
13. Goodfellow I. et al. Generative adversarial networks //Communications of the ACM. – 2020. – Т. 63. – №. 11. – С. 139-144
14. Feng J. Load forecasting of electric vehicle charging station based on grey theory and neural network/ J. Feng, J. Yang, Y. Li, H. Wang, H. Ji, W. Yang, K. Wang//Energy Reports. – 2021. – vol. 7. – pp. 487-492
15. Zhu J. et al. Short-term load forecasting for electric vehicle charging stations based on deep learning approaches //Applied sciences. – 2019. – Т. 9. – №. 9. – С. 1723.
16. Buzna L. et al. An ensemble methodology for hierarchical probabilistic electric vehicle load forecasting at regular charging stations //Applied Energy. – 2021. – Т. 283. – С. 116337.
17. Zhang J. et al. Daily electric vehicle charging load profiles considering demographics of vehicle users //Applied Energy. – 2020. – Т. 274. – С. 115063.
18. Tang, D. Probabilistic modeling of nodal charging demand based on spatial-temporal dynamics of moving electric vehicles/ D. Tang, P. Wang //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2015. – vol. 7. – №. 2. – pp. 627-636.
19. Palomino A., Parvania M. Bayesian hierarchical model for characterizing electric vehicle charging flexibility //2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). – IEEE, 2020. – С. 1-5.
20. Wang B. et al. EV charging algorithm implementation with user price preference //2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). – IEEE, 2015. – С. 1-5.
21. Voronin, V. A. Multi-Agent Modeling of the Development of Electric Charging Infrastructure in the City of Kemerovo / V. A. Voronin, F. S. Nepsha // Electricity. Transmission and Distribution. – 2023. – No. 3(78). – Pp. 10-17. – EDN XVUSOW.
22. Mehboob N. et al. Smart operation of electric vehicles with four-quadrant chargers considering uncertainties //IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Т. 10. – №. 3. – С. 2999-3009

#### **Authors of the publication**

**Nataliia N. Shamarova** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-3912-1320> *Email:* [k15@istu.edu](mailto:k15@istu.edu).

**Iliia N. Shushpanov** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-7121-7651> *Email:* [ilis83@mail.ru](mailto:ilis83@mail.ru).

**Denis S. Fedosov** – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5989-9549> *Email:* [fedosov\\_ds@istu.edu](mailto:fedosov_ds@istu.edu).

**Konstantin V. Suslov** – Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0484-2857> *Email:* [dr.souslov@yandex.ru](mailto:dr.souslov@yandex.ru).

**Andrey G. Batukhtin** – Transbaikalian State University, Chita, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675> *Email:* [batuhtina\\_ir@mail.ru](mailto:batuhtina_ir@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика*

**Получено** **20.03.2025 г.**

**Отредактировано** **11.04.2025 г.**

**Принято** **10.06.2025 г.**

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 62-784.2

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-162-173

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОКРОГО ОДНОЗОННОГО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

Возмилов <sup>1</sup>А.Г., Урманов <sup>2</sup>В.Г., Панишев <sup>1</sup>С.А., Лисов <sup>1</sup>А.А.

<sup>1</sup>Южно-уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия

*Panishef.serega@mail.ru*

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ:* в условиях растущих требований к чистоте воздуха на промышленных предприятиях электрофильтры приобретают особую значимость как эффективное средство удаления вредных частиц из воздушной среды. Вопросы их оптимизации остаются актуальными, поскольку от этого зависит уровень очистки и экономичность производственных процессов. *ЦЕЛЬ:* проведение экспериментального исследования мокрого однозонного электрофильтра и определение влияния конструктивных и режимных параметров на его эффективность. *МЕТОДЫ:* для исследования был использован экспериментальный стенд с мокрым однозонным электрофильтром, в котором изменялись ключевые параметры: напряжение питания, расстояние между электродами, радиус осадительных электродов и скорость воздушного потока. Эффективность работы фильтра оценивалась путем измерения концентрации частиц до и после очистки воздуха. *РЕЗУЛЬТАТЫ:* эксперименты показали, что эффективность очистки воздуха снижается при увеличении скорости воздушного потока и межэлектродного расстояния, в то время как повышение напряжения и диаметра электродов улучшает качество очистки. Получены графические зависимости эффективности от изменяемых параметров, что позволило выявить оптимальные параметры. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ:* оптимизация параметров мокрого однозонного электрофильтра способствует повышению эффективности очистки воздуха, что позволяет снизить вредные выбросы на производственных площадках и улучшить экологичность и экономичность производственных процессов.

**Ключевые слова:** *очистка воздушной среды; электрофильтрация воздуха; эксперимент; оптимизация параметров.*

**Для цитирования:** Возмилов А.Г., Урманов В.Г., Панишев С.А., Лисов А.А. Экспериментальные исследования мокрого однозонного электрофильтра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 162 -173. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-162-173.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF A WET SINGLE-ZONE ELECTROFILTER

Vozmilov<sup>1</sup> A.G., Urmanov<sup>2</sup> V.G., Panishev<sup>1</sup> S.A., Lisov<sup>1</sup> A.A.

<sup>1</sup>South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

*Panishef.serega@mail.ru*

**Abstract:** *RELEVANCE:* In the context of increasing requirements for air purity at industrial enterprises, electrostatic precipitators are of particular importance as an effective means of removing harmful particles from the air. The issues of their optimization remain relevant, since the level of purification and the cost-effectiveness of production processes depend on it. *THE PURPOSE:* To conduct an experimental study of a wet single-zone electrostatic precipitator and determine the influence of design and operating parameters on its efficiency.

**METHODS:** The electrostatic precipitator under study differs from classic electrostatic precipitators in the design of the precipitating electrodes. The precipitating electrodes are made in the form of round, rotating disks, which are half immersed in liquid for continuous cleaning. For the study, an experimental stand with a wet single-zone electrostatic precipitator was used, in which the key parameters were changed: supply voltage, distance between electrodes, radius of the precipitating electrodes and air flow velocity. The efficiency of the filter was estimated by measuring the concentration of particles before and after air purification. Each experiment was carried out for 20 minutes and repeated 5 times. **RESULTS:** Based on the test results, graphs were constructed of the dependence of the air purification efficiency of the electrostatic precipitator on the design and operating parameters. The experiments showed that the air purification efficiency decreases with an increase in the air flow rate and interelectrode distance, while an increase in the voltage and diameter of the electrodes improves the cleaning quality. Graphic dependences of the efficiency on the variable parameters were obtained, which made it possible to identify the optimal parameters. **CONCLUSION:** Optimization of the parameters of the wet single-zone electrostatic precipitator helps to increase the air purification efficiency, which allows to reduce harmful emissions at production sites and improve the environmental friendliness and cost-effectiveness of production processes.

**Keywords:** air purification; air electrofiltration, experiment, optimization of parameters.

**For citation:** Vozmilov A.G., Urmanov V.G., Panishev S.A., Lisov A.A. Experimental studies of a wet single-zone electrofilter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 162-173. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-162-173.

#### **Введение (Introduction)**

В современном промышленном производстве вопросы обеспечения чистоты воздушной среды на производственных площадках и предотвращения загрязнения окружающей среды становятся все более актуальными и приобретают повышенное значение с точки зрения экологических и социально-экономических аспектов [1].

Уменьшение загрязнения воздушной среды производственных помещений позволяет снизить количество заболеваний работников, поскольку загрязненный воздух может содержать пыль, химические вещества, газы, микроорганизмы, негативно влияющие на здоровье работников, вызывая аллергические реакции, респираторные заболевания, интоксикации и даже хронические болезни. Кроме того, недостаточная вентиляция может привести к накоплению токсичных или взрывоопасных веществ, создавая риск аварий. Повышенная концентрация пыли может также привести к загрязнению оборудования, увеличению его износа и даже поломкам [2].

Комфортные условия труда способствуют концентрации работников, снижению утомляемости, увеличению производительности труда и как следствие улучшение качества продукции. Не стоит забывать и про нормы и правила по качеству воздушной среды производственных помещений, несоблюдение требований которых может привести к штрафам, закрытию производства и репутационным потерям.

Достижение необходимого качества воздушной среды производственных помещений возможно с помощью системы вентиляции. Важнейшим элементом системы вентиляции является фильтр, от выбора которого зависит надежность и эффективность работы и качество воздушной среды.

#### **Литературный обзор (Literature Review)**

В научно-технической литературе предлагается множество различных фильтров для очистки воздушной среды помещений. Так в [3] предлагается использование механических фильтров. Механический фильтр обычно выполнен из мелкой сетки или ткани. Его достоинством является дешевизна, однако к недостаткам относится частая замена и не возможность улавливать мелкие частицы.

В [4] для обеззараживания воздушной среды предлагается ультрафиолетовая лампа. Однако она не удаляет аэрозольные частицы. Также автор отмечает, что механические фильтры дешевле, но требуют замену.

Простым и надежным решением для систем очистки воздушной среды является циклонный фильтр [5] он имеет простую конструкцию и низкую стоимость. Однако циклонный фильтр способен эффективно улавливать только крупные частицы, эффективность улавливания мелкодисперсной пыли у него низкая, кроме того, он

обладает высоким аэродинамическим сопротивлением.

Автор [6] отмечает, что высокой эффективностью очистки от мелкодисперсной пыли обладают рукавные фильтры. К недостаткам же таких фильтров относится их высокая цена, сложность конструкции, необходимость регулярного обслуживания и замены рукавов [7].

Высокоэффективными и универсальными фильтрами для очистки воздушной среды являются скрубберы, говорит автор [8]. Они удаляют пыль, газы и химические пары, такие фильтры чаще всего используются на предприятиях химической промышленности. Недостатками являются высокая стоимость, сложность эксплуатации и необходимость большого количества воды.

Самыми эффективными фильтрами являются HEPA-фильтры и ULPA-фильтры [9]. Эффективность их очистки составляет до 99,97%, они задерживают мельчайшие частицы, бактерии и вирусы. К недостаткам таких фильтров относится высокая стоимость, частая замена и высокое сопротивление воздушному потоку. Применяются такие фильтры в основном в больницах, лабораториях, производстве электроники [10].

Перспективным аппаратом для очистки воздушной среды помещений является электрофильтр, отмечает автор [11]. Такие аппараты являются многоразовыми, эффективны от мелкой пыли и дыма, имеют низкие эксплуатационные затраты и низкое сопротивление воздушному потоку.

Анализ литературы показал, что наиболее эффективным, энерго- и ресурсозатратным аппаратом для очистки воздушной среды производственных помещений является электрофильтр. В данном контексте электрофильтры представляют собой важное технологическое решение для эффективной очистки воздуха от частиц пыли, дыма, газов и других вредных веществ [12].

Несмотря на широкое использование электрофильтров в промышленности, вопросы их оптимизации и совершенствования остаются актуальными. Экспериментальные исследования являются необходимым этапом в разработке и улучшении электрофильтров, поскольку позволяют оценить их эффективность, производительность и степень очистки воздуха [13,14].

Главным выходным параметром электрофильтра является его эффективность очистки [15]. Эффективность очистки зависит от множества конструктивных и технологических параметров электрофильтра, которые необходимо учитывать на стадии проектирования, для достижения наиболее эффективной работы электрофильтра [16].

Так, авторы из [17] особое внимание уделяют коронирующим электродам, исследуя зависимость эффективности очистки от формы, расстояния между электродами и от их количества. Анализ показал, что наиболее эффективными являются электроды игольчатой формы [18].

Также на работу электрофильтра сказывается и полярность подводимого напряжения. Анализ [19] показал, что при отрицательной короне, пробой происходит при большем напряжении и эффективность очистки выше. При проектировании мокрого однозонного электрофильтра была выбрана отрицательная полярность питающего напряжения.

В работе [20] было затронуто влияние источника напряжения на эффективность очистки, однако это влияние достаточно мало и в данной работе затронуто не будет.

Наиболее сильное влияние на эффективность очистки электрофильтром оказывают такие конструктивные параметры как: длина зоны осаждения, количество осадительных электродов, расстояние между осадительными электродами, и технологические параметры такие как: скорость воздушного потока и величина питающего напряжения [21]. В текущем исследовании внимание будет обращено на данные технологические и конструктивные параметры.

Цель исследования заключается в проведении экспериментального исследования мокрого однозонного электрофильтра с последующим определением влияния различных параметров на эффективность его работы.

Научная значимость исследования состоит в получении новых аналитических зависимостей эффективности очистки воздуха мокрым однозонным электрофильтром от его конструктивных и режимных параметров.

Практическая значимость исследования заключается в определении оптимальных параметров работы электрофильтра (напряжение, скорость воздушного потока, расстояние между электродами и др.), что обеспечит более высокую степень улавливания аэрозольных частиц.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

Объектом исследования является мокрый однозонный электрофильтр. На рисунке 1 представлена конструкция мокрого однозонного электрофильтра (МЭФ), разработанного на основе обширной технической литературы [22, 23, 24, 25, 26].

Конструкция включает корпус из коррозионностойких материалов, входной и выходной патрубки для поступления загрязненного газа и выхода очищенного, электродную систему с коронирующими электродами для зарядки частиц и осадительными электродами для их осаждения, систему для смачивания осадительных электродов и сливную систему для удаления загрязненной жидкости, привод вращения вентилятора, привод вращения осадительных электродов, а также систему питания и управления для обеспечения работы устройства [27].

Отличительной особенностью данного фильтра является форма осадительных электродов. Осадительные электроды выполнены круглой формы, наполовину опущены в омывающую жидкость.

Принцип работы состоит в том, что загрязненный газ поступает внутрь, аэрозольные частицы заряжаются и оседают на электродах. Вращаясь, электроды проходят через жидкость, жидкость смывает осевшие частицы. Очищенный газ выходит наружу. Данное техническое решение позволяет непрерывно очищать электрофильтр, не давая ему загрязняться и сохраняя высокую эффективность очистки на протяжении долгого времени. Мокрые электрофильтры эффективны для удаления мелкодисперсных частиц и аэрозолей и используются в различных промышленных отраслях [28].

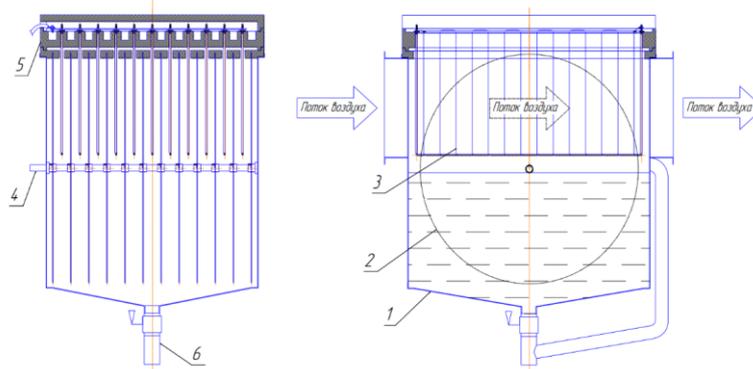


Рис. 1. Конструкция мокрого однозонного электрофильтра: 1 – корпус; 2 – осадительные электроды; 3 – коронирующие электроды; 4 – вал; 5 – изоляционная плита

Fig. 1. Construction of a wet single-zone electrostatic precipitator: 1 – housing; 2 – precipitation electrodes; 3 – corona electrodes; 4 – shaft; 5 – insulating plate

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Изготовленный опытный образец мокрого однозонного электрофильтра (рис.2) состоит из корпуса, выполненного из нержавеющей стали. Внутри корпуса расположены 14 круглых осадительных электродов диаметром 400 мм, толщина электрода – 3 мм, расстояние между осадительными электродами – 25 мм, между осадительными электродами расположены коронирующие электроды, выполненные в виде игольчатых стержней (рис.3), глубина вхождения осадительного электрода в изоляционную плиту – 5 мм.



Рис. 2. Опытный образец МЭФ

Fig. 2. Prototype of a wet electrostatic precipitator

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях производились в лабораториях кафедры «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве» Южно-Уральского государственного аграрного университета (г. Челябинск).

Для проведения испытаний в лабораторных условиях использовался экспериментальный стенд (рис. 3), в основу которого был положен опытный образец мокрого однозонного электрофильтра

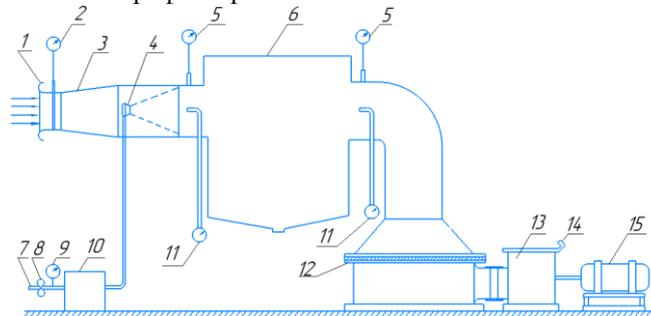


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: 1 – Входной коллектор, 2 – Расходомер, 3 – Диффузор, 4 – Распылитель-диагломератор, 5 – Микроманометр, 6 – Испытываемый мокрый однозонный электрофильтр, 7 – Трубопровод сжатого воздуха, 8 – Вентиль, 9 – Манометр, 10 – Пыледозатор, 11 – Счетчик аэрозольных частиц, 12 – Абсолютный фильтр, 13 – Вентилятор, 14 – Шибера, 15 – Электродвигатель

Fig. 3. Diagram of the experimental stand: 1 – Inlet manifold, 2 – Flowmeter, 3 – Diffuser, 4 – Spray-diagglomerator, 5 – Micromanometer, 6 – Wet single-zone electrostatic precipitator under test, 7 – Compressed air pipeline, 8 – Valve, 9 – Pressure gauge, 10 – Dust dispenser, 11 – Aerosol counter particles, 12 – Absolute filter, 13 – Fan, 14 – Gate, 15 – Electric motor

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Воздух втягивается в испытательный стенд из помещения при помощи вентилятора 13. Вентилятор с электродвигателем 15 монтируются на двух самостоятельных основаниях. Для исключения передачи вибрации от вентилятора к стенду в соединяющем их трубопроводе устанавливается эластичная вставка. Лопаточные колеса вентиляторов приводятся во вращение асинхронным электродвигателем и обеспечивают расход воздуха до 1000 м<sup>3</sup>/ч.

Заготовленная пыль подается через распылитель-диагломератор 4 на электрофильтр от пыледозатора 10 при помощи давления сжатого воздуха [29].

Для предотвращения попадания пыли из установки в помещение для проведения эксперимента, на выходе стенда установлен абсолютный фильтр 12.

В абсолютном фильтре ткань уложена на плоскую раму. В качестве фильтрующего материала в абсолютном фильтре используется материал ФПП-15.

Регулирование расхода воздуха в стендах осуществляется с помощью шиберы 14, установленного на выхлопе вентилятора [30].

Расход воздуха в стенде измеряется с помощью расходомера Метран-350-MFA на базе осредняющей напорной трубки ОНТ Annubar 485. Принцип действия расходомеров основан на измерении расхода среды методом переменного перепада давления.

Измерение концентрации пыли до и после фильтра измеряется при помощи счетчика 11 аэрозольных частиц Fluke 983.

В помещении стенда контролируются параметры воздушной среды: температура, давление, влажность и запыленность. Температура воздуха измеряется ртутным термометром, барометрическое давление – ртутным барометром, относительная влажность – аспирационным психрометром. Запыленность воздуха устанавливается анализатором пыли Атмас.

#### *Проведение испытаний и оформление результатов*

Испытание фильтров проводят путем очистки воздуха, искусственно запыленного экспериментальной пылью. Воздух перед его запылением забирается из помещения.

Эффективность определяют на основе измерения количества пылевых частиц до и после испытываемого электрофильтра [31].

Для выявления влияния параметров электрофильтра на эффективность очистки, в ходе эксперимента изменялись такие параметры как напряжение питания, расстояние между осадительными электродами, радиус осадительных электродов, скорость воздушного потока [32].

Каждый эксперимент проводился в течение 20 минут, и повторялся 5 раз. Результаты экспериментов сводились в таблицу и обрабатывались с помощью

статистических методов, для определения среднего значения, ошибки и определения эффективности очистки. Результаты эксперимента представляются в виде графиков зависимости эффективности очистки воздуха от изменяемого параметра электрофильтра.

На основе полученных данных формулируются выводы о ключевых параметрах, влияющих на эффективность работы электрофильтра, и даются рекомендации по улучшению конструкции и режима работы. Эти испытания помогают оптимизировать существующие модели и разрабатывать новые, более эффективные устройства для очистки газов в различных промышленных условиях.

Также были получены вольтамперные характеристики мокрого электрофильтра для определения максимального напряжения. Вольтамперные характеристики были сняты для сухого режима, когда в электрофильтр не была залита жидкость и для мокрого режима, когда электрофильтр был наполнен жидкостью. Осадительные электроды при этом были приведены во вращение. Вольтамперные характеристики были сняты для фильтра, с параметрами, описанными выше.

При снятии вольтамперных характеристик были использованы киловольтметр ТЕТРОН-KB20 и миллиамперметр СА3010/2-000.

Изменение напряжения было ступенчатое, с шагом 2 кВ, для каждого значения напряжения измерялся ток, протекающий через фильтр. Увеличение напряжения происходило до пробоя. По результатам измерений были построены графики зависимости тока коронного разряда от напряжения питания.

### Результаты (Results)

#### Снятие вольтамперной характеристики

Результаты по снятию вольтамперной характеристики мокрого однозонного электрофильтра представлены на рисунке 4.

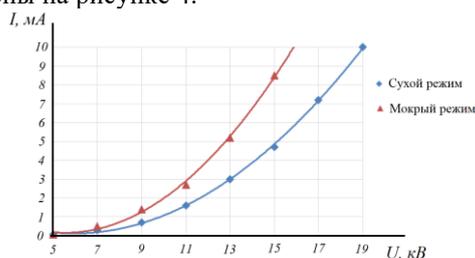


Рис. 4. Вольтамперная характеристика мокрого однозонного электрофильтра *Fig. 4. Voltage characteristic of a wet single-zone electrostatic precipitator*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Анализ результатов сравнения показал, что вольтамперная характеристики электрофильтра, заполненного жидкостью круче. При равном напряжении, ток коронного разряда в мокром режиме больше. Это объясняется наличием мелкодисперсного жидкостного аэрозоля в межэлектродном промежутке, вследствие чего увеличивается влажность воздушного потока, что и приводит к повышению тока коронного разряда.

Пробой воздушного промежутка в мокром режиме наступает раньше, что также объясняется больше влажностью воздушного потока, по сравнению с сухим режимом. Пробой в сухом режиме для описанных параметров электрофильтра происходит при напряжении больше 19кВ, в сухом режиме, при напряжении больше 16кВ, это соответствует напряженности электрического поля 7,6 кВ/см и 6,4 кВ/см соответственно.

Таким образом для дальнейших испытаний мокрого однозонного электрофильтра принято значение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве, не более 6,4 кВ/см.

#### Исследование эффективности электрофильтра

Первая группа экспериментов направлена на определение зависимости эффективности работы электрофильтра от скорости воздушного потока для различных значений размеров аэрозольных частиц.

В таблице 1 представлена обработка результатов эксперимента для скорости воздушного потока 220 м<sup>3</sup>/ч и размера частицы 1 мкм. Аналогичным образом обработаны значения для скоростей воздушного потока 350, 420, 500, 600 и 700 м<sup>3</sup>/ч (таблица 2). По результатам построена зависимость эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для размеров аэрозольных частиц 1 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм (рисунок 5).

Таблиц 1  
Table 1

Результаты эксперимента  
Experimental results

Номер опыта	Количество частиц перед фильтром, шт	Количество частиц после фильтра, шт	Эффективность фильтра
1	123648	241	0,998
2	113546	169	0,999
3	145862	208	0,999
4	135479	458	0,997
5	129746	542	0,996
		Среднее значение	0,998
		Погрешность	0,1%

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблиц 2  
Tables 2

Результаты эксперимента  
Experimental results

Скорость воздушного потока, м <sup>3</sup> /ч	Эффективность фильтра	Погрешность, %
220	0,998	0,1
350	0,990	0,17
420	0,979	0,13
500	0,970	0,2
600	0,937	0,6
700	0,870	0,9

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

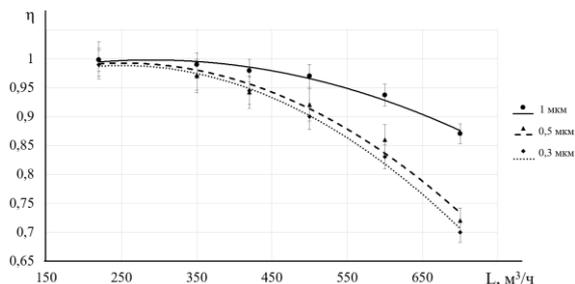


Рис. 5. Экспериментальные зависимости эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для аэрозольных частиц размеров 1 мкм, 0,5 мкм и 0,3 мкм

Fig. 5. Experimental dependences of the efficiency of the electrostatic precipitator on the air flow velocity for aerosol particles of sizes 1 microns, 0.5 microns and 0.3 microns

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Второй группой экспериментов была направлена на определение зависимости эффективности электрофильтра от напряжения питания. Результат эксперимента представлена на рисунке 6.

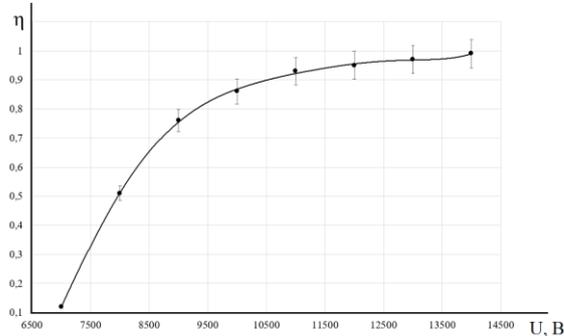


Рис. 6. Экспериментальная зависимость эффективности электрофильтра от напряжения питания

Fig. 6. Experimental dependence of the efficiency of the electrostatic precipitator on the supply voltage

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Третья группа экспериментов была направлена на определение влияния расстояния между осадительными электродами на эффективность электрофильтра.

Сняты экспериментальные зависимости эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для межэлектродных расстояний 0,025 м, 0,03 м, 0,035 м и 0,04 м. Результаты представлены на рисунке 7.

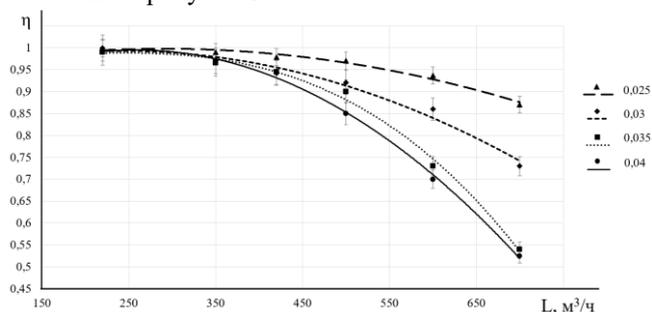


Рис. 7. Экспериментальная зависимость эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока для межэлектродных расстояний 0,025 м, 0,03 м, 0,035 м и 0,04 м

Fig. 7. Experimental dependence of the efficiency of the electrostatic precipitator on the air flow velocity for interelectrode distances of 0.025 m, 0.03 m, 0.035 m and 0.04 m

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Четвертая группа экспериментов была направлена на выявление влияния радиуса осадительных электродов на эффективность электрофильтра. Были изготовлены осадительные электроды радиусом 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м и 0,5 м. Для каждой группы осадительных электродов были сняты зависимости эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока. Результаты эксперимента представлены на рисунке 8.

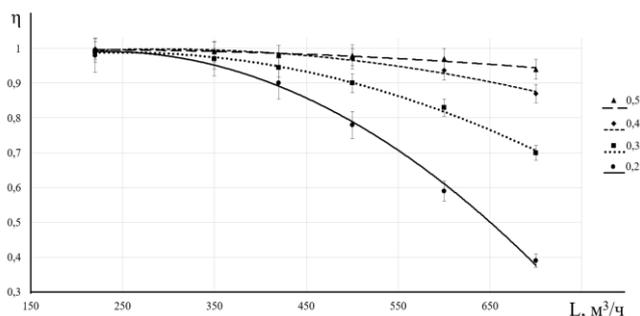


Рис. 8. Экспериментальная зависимость эффективности электрофильтра от скорости воздушного потока при осадительных электродах радиусом 0,2 м, 0,3 м, 0,4 м и 0,5 м

Fig. 8. Experimental dependence of the efficiency of the electrostatic precipitator on the air flow velocity at precipitation electrodes with a radius of 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m and 0.5 m

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Обсуждение (Discussions)

Анализ экспериментальных зависимостей показал, что:

- при увеличении скорости воздушного потока, эффективность улавливания аэрозольных частиц мокрым однозонным электрофильтром уменьшается, что объясняется вторичным уносом частиц аэрозоля потоком воздуха;
- эффективность очистки для разных размеров аэрозольных частиц отличается. Чем меньше размер частиц, тем эффективность меньше, что свидетельствует об уменьшении действия силы Кулона на осадительную частицу меньшего диаметра из-за меньшего ее заряда;
- эффективность очистки мокрым электрофильтром тем ниже, чем ниже напряжение питания, что объясняется уменьшением мощности коронного разряда и, соответственно, уменьшению заряда частиц аэрозоля;
- эффективность очистки мокрым электрофильтром зависит от расстояния между осадительными электродами. Чем больше расстояние между осадительными электродами, тем меньше эффективность электрофильтра, что объясняется снижением напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке;
- эффективность очистки мокрым электрофильтром зависит от диаметра осадительных электродов. Чем меньше диаметр осадительных электродов, тем меньше эффективность электрофильтра, что объясняется уменьшением площади осаждения электрофильтра.

### **Заключение (Conclusions)**

Экспериментальные исследования позволяют получить зависимости эффективности мокрого однозонного электрофильтра от конструктивных и технологических параметров.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить степень влияния параметров мокрого однозонного электрофильтра на эффективность его работы. Результаты показали, что увеличение скорости воздушного потока и расстояния между электродами снижает эффективность очистки, в то время как увеличение напряжения и диаметра осадительных электродов способствует более эффективному улавливанию частиц.

Полученные зависимости позволяют получить оптимальные параметры электрофильтра для его наиболее эффективной работы, что обеспечит повышение экологичности и экономичности промышленного производства.

### **Литература**

1. Чикляев Е.Г., Танеева А.В., Коротаев О.Р. Проблемы экологической безопасности воздушной среды промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 122-130.
2. Преображенский Ю.П. О проблемах качества воздушной среды и загрязнении атмосферы // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений. 2020. С. 219-222.
3. Бородина М. А., Кича М. А., Михайленко В. С. Очистка воздушной среды от жидких и твердых аэрозолей с использованием фильтра УОВ-ФА // Вестник МАНЭБ. 2023. Т. 28. №. 1. С. 28.
4. Данышова А. С. Обеззараживание воздуха в вентиляционных системах // Научный аспект. 2024. №6. С. 7149-7155.
5. Мальчик А.Г., Тишук А.А., Романюк Р.А. Запыленность воздушной среды деревообрабатывающих цехов. Способы снижения концентрации пыли в воздухе рабочей зоны // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции, 25–27 мая 2023 г., Юрга. Томский политехнический университет, С. 177-180.
6. Mata T.M., Martins A.A., Calheiros C.S., et al. Indoor air quality: a review of cleaning technologies // *Environments*. 2022. Т. 9. №. 9. С. 118.
7. Swamy G. Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality // *Heliyon*. 2021. Т. 7. №. 10.
8. Базыкин В.И. Способы снижения выбросов климатически активных газов на свинофермах // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. №. 4 (117). С. 113-129.
9. Гулай Е. С., Зарипов Р. И. Роль высокоэффективных фильтров в жизнеобеспечении // *Актуальные научные исследования от теории к практике: сборник материалов международной научно-практической конференции, 19 января 2024 г., Москва*. Т2. С. 75.
10. Dubey S., Rohra H., Taneja A. Assessing effectiveness of air purifiers (HEPA) for controlling indoor particulate pollution // *Heliyon*. 2021. Т. 7. №. 9.
11. Viner A. S. et al. Air cleaners for indoor air pollution control // *Indoor Air Pollution*. – CRC Press, 2021. – С. 115-131.
12. Возмилов А.Г., Илимбетов Р.Ю., Панишев С.А., и др. Анализ электрофильтров для очистки воздушной среды производственных помещений // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. №. 2. С. 78-96.
13. Chen L., Gonze E., Ondarts M., et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments // *Separation and Purification Technology*. 2020. Т. 247. С. 116964.
14. Pal A., Dixit A., Srivastava A.K. Design and optimization of the shape of electrostatic precipitator system // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Т. 47. С. 3871-3876.
15. Lee G.H., Hwang S.Y., Cheon T.W., et al. Optimization of pipe-and-spike discharge electrode shape for improving electrostatic precipitator collection efficiency // *Powder Technology*. 2021. Т. 379. С. 241-250.
16. Wang P. Liu J., Wang C., et al. A holistic performance assessment of duct-type electrostatic precipitators // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Т. 357. С. 131997.
17. Andrade R.G., Guerra V.G. Discharge electrode influence on electrostatic precipitation of nanoparticles // *Powder Technology*. 2021. Т. 379. С. 417-427.
18. Wang X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator // *Powder Technology*. 2020. Т. 366. Р. 36-42.
19. Шавкунов М. Л., Корепанов А. С., Лекомцев П. Л. Исследование влияния полярности

коронного разряда на работу электрофильтра // Научные разработки и инновации в решении стратегических задач агропромышленного комплекса. 2022. С. 304-308.

20. Пархомчук Г. Е. Исследование влияния выходных параметров источников высокого напряжения на параметры электрофильтров // Актуальные вопросы современной науки и образования. 2024. С. 20.

21. Селезнева Д. М. Проведение испытаний многозонного электрофильтра для обеспыливания воздуха сельскохозяйственных помещений // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 2 (31). С. 12-17.

22. Катин В. Д., Журавлев А. А. Разработка новой конструкции высокоэффективного циклона-электрофильтра для угольных котельных // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов. 2022. С. 60-64.

23. Слободскова А.А., Белименко С.О., Суслов И.А., и др. К вопросу эффективности мокрого электрофильтра при очистке воздуха // Эффективность применения инновационных технологий и техники в сельском и водном хозяйстве. 2020. С. 411-413.

24. Badami M. M. et al. Design, optimization, and evaluation of a wet electrostatic precipitator (ESP) for aerosol collection // Atmospheric Environment. – 2023. – Т. 308. – С. 119858.

25. Lee H., Tohidi R., Aldekheel M., et al. Development of electrostatic-precipitator-type air conditioner for reduction of fine particulate matter in subway // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Т. 58. № 3. С. 3992-3998.

26. Knight R.M., Hocter J.S., Milliken S.R., et al. Development and optimisation of full-scale prototype electrostatic precipitators in a laboratory for particulate matter mitigation in poultry facilities // Biosystems Engineering. 2023. Т. 230. С. 71-82.

27. Юркин В.В., Илимбетов Р.Ю., Дмитриев А.А., и др. К вопросу расчета конструктивных параметров мокрого электрофильтра // АгроЭкоИнфо. 2023. № 5 (59).

28. Возмилов А.Г., Андреев Л.Н., Панишев С.А., и др. Использование двухступенчатого мокрого электрофильтра в системах очистки рециркуляционного воздуха в производственных помещениях сельского хозяйства с целью снижения заболеваемости рабочих // Вестник НГИЭИ. 2022. № 5 (132). С. 45-54.

29. Красилова В.А., Коссович Е.Л., Гаврилова Д.И., и др. Лабораторная установка для улавливания и концентрирования взвешенной угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 6. С. 121-130.

30. Zhu Y., Chen C., Shi J., et al. Experimental investigation of the effect of collection length in a two-stage electrostatic precipitator for removal of PM<sub>2.5</sub> // Chemical Engineering Journal. 2021. Т. 421. С. 127797.

31. Chen L., Gonze E., Ondarts M., et al. Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments // Separation and Purification Technology. 2020. Т. 247. С. 116964.

32. Zhou W., Jiang R., Sun Y., et al. Study on multi-physical field characteristics of electrostatic precipitator with different collecting electrodes // Powder Technology. 2021. Т. 381. С. 412-420.

#### Авторы публикации

**Возмилов Александр Григорьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. [vozmiag@rambler.ru](mailto:vozmiag@rambler.ru).

**Урманов Виль Губаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика и компьютерный инжиниринг» Башкирского государственного аграрного университета. *ORCID*: <http://orcid.org/0009-0007-8328-0392>. [uvg55@mail.ru](mailto:uvg55@mail.ru).

**Панишев Сергей Алексеевич** – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. [panishef.serega@mail.ru](mailto:panishef.serega@mail.ru).

**Лисов Андрей Анатольевич** – аспирант кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-уральского государственного университета (НИУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. [lisov.andrey2013@yandex.ru](mailto:lisov.andrey2013@yandex.ru).

#### References

1. Chiklyaev E.G., Taneeva A.V., Korotaev O.R. Problems of environmental safety of the air environment of industrial enterprises // News of higher educational institutions. Energy problems. 2010. No. 3-4. pp. 122-130.

2. Preobrazhensky Yu.P. On the problems of air quality and atmospheric pollution // Innovative methods of designing building structures of buildings and structures. 2020. pp. 219-222.
3. Borodina M. A., Kicha M. A., Mikhailenko V. S. Purification of the air environment from liquid and solid aerosols using a UV-FA filter // Bulletin of MANEB. 2023. Vol. 28. No. 1. p. 28.
4. Danshova A. S. Disinfection of air in ventilation systems // Scientific aspect. 2024. No. 6. pp. 7149-7155.
5. Boy A.G., Tishchuk A.A., Romanyuk R.A. Dustiness of the air environment of woodworking shops. Ways to reduce the concentration of dust in the air of the working area // Innovative technologies in mechanical engineering: proceedings of the XIV Scientific and Practical International Conference, May 25-27, 2023, Jurga. Tomsk Polytechnic University, pp. 177-180.
6. Mata T.M., Martins A.A., Calheiros K.S. and others. Indoor air quality: an overview of cleaning technologies // Environment. 2022. Vol. 9. No. 9. p. 118.
7. Swami G. Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality. 2021. Vol. 7. No. 10.
8. Bazykin V.I. Ways to reduce emissions of climatically active gases on pig farms // Agroecoengineering. 2023. No. 4 (117). pp. 113-129.
9. Gulai E. S., Zaripov R. I. The role of high-efficiency filters in life support // Current scientific research from theory to practice: proceedings of the International Scientific and practical Conference, January 19, 2024, Moscow. T2. P. 75.
10. Dubey S., Rora H., Taneya A. Evaluation of the effectiveness of air purifiers (HEPA) for the control of indoor pollution by solid particles // Heliyon. 2021. Vol. 7. No. 9.
11. Viner A. S. and others. Air purifiers to combat indoor air pollution // Indoor air pollution. – CRC Press, 2021. – pp. 115-131.
12. Vozdilov A.G., Ilimbetov R.Yu., Panishev S.A., and others. Analysis of electrostatic precipitators for air purification of industrial premises // News of higher educational institutions. Energy problems. 2024. Vol. 26. No. 2. pp. 78-96.
13. Chen L., Gonze E., Ondarts M. et al. An electrofilter for removing fine and ultrafine particles from indoor air // Separation and purification technology. 2020. Vol. 247. pp. 116964.
14. Pal A., Dixit A., Srivastava A.K. Design and optimization of the shape of the electrostatic precipitator system // Materials today: Proceedings. 2021. Vol. 47. pp. 3871-3876.
15. Lee G.H., Hwang S.Y., Cheon T.V. and others. Optimization of the shape of the tubular discharge electrode to increase the efficiency of collecting the electrostatic precipitator // Powder technologies. 2021. Vol. 379. pp. 241-250.
16. Wang P., Liu J., Wang S. et al. Comprehensive assessment of the effectiveness of channel electrostatic precipitators // Journal of environmentally friendly production. 2022. Vol. 357. pp. 131997.
17. Andrade R.G., Guerra V.G. The effect of a discharge electrode on the electrostatic deposition of nanoparticles // Powder technology. 2021. Vol. 379. pp. 417-427.
18. Wang H. The effect of corona discharge propagation on the characteristics of an electrofilter // Powder technology. 2020. Vol. 366. pp. 36-42.
19. Shavkunov M. L., Korepanov A. S., Lekomtsev P. L. Investigation of the effect of corona discharge polarity on the operation of an electrofilter // Scientific developments and innovations in solving strategic tasks of the agro-industrial complex. 2022. pp. 304-308.
20. Parkhomchuk G. E. Investigation of the influence of output parameters of high voltage sources on the parameters of electrostatic precipitators // Actual issues of modern science and education. 2024. p. 20.
21. Selezneva D. M. Conducting tests of a multi-zone electrostatic precipitator for dedusting the air of agricultural premises // Agrotechnics and energy supply. 2021. No. 2 (31). pp. 12-17.
22. Katin V. D., Zhuravlev A. A. Development of a new design of a highly efficient cyclone-electric filter for coal-fired boilers // Development of modern science and technology in conditions of transformation processes. 2022. pp. 60-64.
23. Slobodskova A.A., Belimenko S.O., Suslov I.A., and others. On the issue of the effectiveness of a wet electrostatic precipitator in air purification // The effectiveness of the use of innovative technologies and equipment in agriculture and water management. 2020. pp. 411-413.
24. Badami M. M. et al. Design, optimization and evaluation of a wet electrostatic precipitator (ESP) for aerosol collection // Atmospheric environment. – 2023. – Vol. 308. – p. 119858.
25. Lee H., Tohidi R., Aldehil M. et al. Development of an air conditioner with an electrostatic precipitator to reduce the content of fine solid particles in the subway // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Vol. 58. No. 3. pp. 3992-3998.
26. Knight R.M., Hoche J.S., Milliken S.R. et al. Development and optimization of full-scale prototypes of electrostatic precipitators in the laboratory to reduce the content of solid particles in poultry farms // Biosystem Engineering. 2023. Vol. 230. pp. 71-82.

27. Yurkin V.V., Ilimbetov R.Yu., Dmitriev A.A., and others. On the issue of calculating the structural parameters of a wet electrofilter // AgroEcoInfo. 2023. № 5 (59).

28. Vozdilov A.G., Andreev L.N., Panishev S.A., and others. The use of a two-stage wet electrostatic precipitator in recirculating air purification systems in agricultural production facilities in order to reduce the incidence of workers // Bulletin of the NGIEI. 2022. № 5 (132). Pp. 45-54.

29. Krasilova V.A., Kossovich E.L., Gavrilova D.I., and others. Laboratory installation for the capture and concentration of suspended coal dust // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2022. No. 6. pp. 121-130.

30. Zhu Yu., Chen K., Shi J. and others. An experimental study of the effect of the collection length in a two-stage electrostatic precipitator on the removal of PM<sub>2.5</sub> // Journal of Chemical Engineering. 2021. Vol. 421. p. 127797.

31. Chen L., Gonze E., Ondarts M. et al. An electrofilter for removing fine and ultrafine particles from indoor air // Separation and purification technology. 2020. Vol. 247. pp. 116964.

32. Zhou W., Jiang R., Sun Yu. and others. Investigation of the characteristics of the multiphysical field of an electrofilter with various collecting electrodes // Powder technology. 2021. Vol. 381. pp. 412-420.

#### **Authors of the publication**

**Alexander G. Vozmilov** – Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>. [vozmiag@rambler.ru](mailto:vozmiag@rambler.ru).

**Vil G. Urmanov** – Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia. *ORCID*: <http://orcid.org/0009-0007-8328-0392>. [uvg55@mail.ru](mailto:uvg55@mail.ru).

**Sergey A. Panishev** – South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>. [panishef.serega@mail.ru](mailto:panishef.serega@mail.ru).

**Andrey A. Lisov** – South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>. [lisov.andrey2013@yandex.ru](mailto:lisov.andrey2013@yandex.ru)

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** 11.11.2024 г.

**Отредактировано** 21.02.2025 г.

**Принято** 18.03.2025 г.



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕМБРАННЫХ МУФТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Клейдман О.В., Маслов И.Н., Николаева Н.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

[olgakdpm@mail.ru](mailto:olgakdpm@mail.ru)

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Разработать программу с использованием методов численного моделирования для исследования НДС мембранной муфты с промежуточным валом и элементами, гасящими вибрации, с возможностью разработки новых конструкций муфт, способных компенсировать более значительные осевые, угловые и радиальные смещения валов ГПА при высоких значениях частоты вращения. *МЕТОДЫ.* Алгоритм разрабатывается на основе метода конечных элементов в ПК ANSYS. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности и достоинства выбранной конструкции мембранной муфты. Построен универсальный численный алгоритм, который даёт возможность оценивать прочность конструкции муфты из разных материалов, передающей крутящий момент, с выявлением опасных зон высоких напряжений и предельных значений частоты вращения, а также способность компенсировать несоосность валов турбины и нагнетателя. Программа позволяет быстро варьировать исходными геометрическими параметрами с автоматическим построением новой 3D модели. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Работа направлена на повышение эффективности и надёжности работы газоперекачивающих агрегатов и газотранспортной системы. Результаты расчета показали, что заявленные свойства рассматриваемой мембранной муфты на различных режимах эксплуатации, ее способность компенсировать перекосы соединяемых валов подтвердились. Дальнейшее дополнение программы планируется с помощью анализа напряжений от переменной (циклической) составляющей крутящего момента, построения математической модели колебаний валопровода с учётом демпфирования опор.

**Ключевые слова:** мембранные муфты; надёжность; несоосность; газоперекачивающий агрегат; МКЭ.

**Для цитирования:** Клейдман О.В., Маслов И.Н., Николаева Н.В. Численное моделирование компенсирующих свойств мембранных муфт для повышения надёжности работы газоперекачивающих агрегатов в энергосистемах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 174 -186. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-174-186.

## FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) OF MEMBRANE COUPLING STRESS UNDER GAS PUMPING UNIT SHAFTS MISALIGNMENT

Kleidman OV., Maslov I.N., Nikolaeva N.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

[olgakdpm@mail.ru](mailto:olgakdpm@mail.ru)

**Abstract:** *THE PURPOSE.* The purpose of this work is to develop a program that uses the finite element method to analyze the stress-strain state of a membrane coupling capable of compensating for axial, angular, and radial misalignments of the shafts in a gas pumping unit. *METHODS.* The finite element method of the ANSYS software package underpins the algorithm's development. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic and examines the features and advantages of the chosen membrane coupling design. The developed universal numerical algorithm allows to estimate the strength of the coupling structure transmitting torque, made of various materials. The program helps to find zones of increased stress and extreme values of rotation speed, as well as the ability to compensate for the misalignment of the turbine and supercharger shafts. The program allows you to quickly change the initial geometric parameters with automatic construction of a new

*3D model. CONCLUSIONS. This research focuses on improving the efficiency and reliability of gas pumping units and the gas transmission system. Calculation results confirmed the claimed properties of the membrane coupling under various operating conditions, including its ability to compensate for shaft misalignment. Further program development will involve analyzing stresses from the variable (cyclic) component of the torque, and constructing a mathematical model of the shaft line vibrations, taking into account bearing damping.*

**Keywords:** *membrane couplings; stresses; shaft misalignment; gas pumping unit; FEM.*

**For citation:** Kleidman O.V., Maslov I.N., Nikolaeva N.V. Finite element analysis (fea) of membrane coupling stress under gas pumping unit shafts misalignment. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 174-186. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-174-186.

### **Введение и литературный обзор (Introduction and literature review)**

Актуальность исследования разрушения мембранных муфт газоперекачивающих агрегатов (ГПА) методом конечных элементов (МКЭ) обоснована несколькими ключевыми аспектами:

1. Безопасность и надежность: мембранные муфты играют критически важную роль в обеспечении герметичности и надежности работы ГПА, не должны допускать утечки газа.

2. Экономические потери: недостаточная надежность муфт может приводить к простоем оборудования, увеличению затрат на транспортировку газа. Проведение исследований, направленных на улучшение прочности и долговечности мембранных муфт, снижает затраты на обслуживание и ремонт.

3. Увеличение срока службы оборудования: понимание механизмов разрушения и факторов, влияющих на прочность мембранных муфт, позволяет разрабатывать более надежные конструкции, что увеличивает ресурс газоперекачивающих агрегатов.

4. МКЭ позволяет проводить точный всесторонний анализ конструкций под различными нагрузками с учётом разных механических свойств материалов и помогает выявлять слабые места в конструкции еще до физического тестирования, что показано в работах [1, 2, 3], причём при использовании разных ППП. Опыт использования современных методов математического моделирования и численных симуляций новая основа для будущих ответственных исследований в энергетике, что подтверждается в работе [4] интеграцией программных комплексов.

5. Актуальность в свете современных вызовов: с учётом глобальных энергосберегающих инициатив и перехода на более чистые источники энергии, ГПА остаются ключевыми в газовой промышленности. Поэтому исследования, подобные [5], направленные на изучение режимов работы турбин при различных нагрузках, крайне важны, ведь они имеют прямое отношение к повышению эффективности газоперекачивающих агрегатов.

6. Применение новых или сочетание разных материалов требует проведения исследований для оценки их надежности. Построенный и отлаженный на основе МКЭ алгоритм может помочь в быстром внедрении новых методов диагностики, подобно работе [6].

В нашей стране производится и эксплуатируется множество газоперекачивающих агрегатов различной конструкции [7, 8]. С целью повышения эффективности ГПА многие научно-технические работы посвящены транспортировке или участию газообразных топлив, учитывая состав и качество газа [9, 10, 11]. В данной же работе уделяется внимание вопросам надежности и долговечности механизмов, разработке математической модели, позволяющей оценить их напряжённо-деформированное состояние (НДС), аналогично результатам, описанных в [6, 12, 13]. Рассматривается один из основных узлов ГПА – соединение вала газотурбинного двигателя с валом нагнетателя посредством мембранной муфты с промежуточным валом (рис.2). Исследования подобных устройств в основном сосредоточились на пластинчатых муфтах [14, 15]. Мембранные муфты предпочтительнее обычных дисковых для синхронных двигателей, где присутствует крутильная вибрация во время запуска, есть и другие преимущества, отмеченные ниже. В литературе недостаточно представлены исследования полной металлической муфты с несколькими мембранами, с промежуточным валом и демпфером продольных колебаний, в основном — расчёт характеристик только отдельного мембранного упругого диска [16], а также исследование потери его устойчивости в зависимости от формы сечения мембран [17].

Известны различные изобретения мембранных муфт для ГПА магистральных газопроводов. Наиболее эффективное принадлежит авторам Мягких Ю.П., Кислицыну Г.Ф., Будусову В.Г. и Захарову А.Г. Они разработали и запатентовали [18] специальную муфту (рис.1) для соединения валов газотурбинного двигателя и нагнетателя в ГПА, которая использует промежуточный вал с мембранами на концах и дополнительный валик с пружинами, который гасит продольные вибрации. Валик прижимается к промежуточному валу двумя сжатыми пружинами, через специальный фланец. Пружины обеспечивают более равномерное распределение нагрузки на мембраны как в нормальных условиях работы, так и при несоосности валов, снижая риск разрушения от вибрации и перегрузки. Это также исключает необходимость предварительного растяжения мембран для компенсации температурного расширения, что позволяет создавать более компактные муфты.

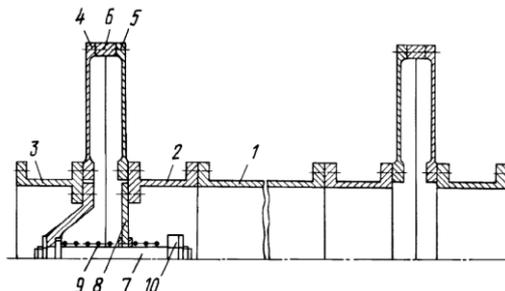


Рис. 1. Двойная мембранная муфта: 1 – промежуточный вал двигателя; 2, 3 – ступицы; 4, 5 – гибкие мембраны; 6 – соединительное кольцо; Демпфер продольных колебаний состоит из валика 7, фланца 8 и пружин 9, поджатой гайкой 10

Fig. 1. Double Membrane Coupling: 1 – Intermediate Engine Shaft; 2, 3 – Hubs; 4, 5 – Flexible Membranes; 6 – Connecting Ring. The longitudinal vibration damper consists of roller 7, flange 8, springs 9, and nut 10

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В практике часто используется похожая схема (рис.2) с небольшими отличиями-усовершенствованиями. В данной статье строится 3D модель этой схемы и проверяются её свойства и НДС. При наличии демпфера, закреплённого со стороны одной мембраны, нагрузка перераспределяется на другой мембранный узел. Это может потребовать увеличения размеров мембран. Но данная схема снижает риск следующих проблем прототипов муфты: 1. Когда валы смещаются относительно друг друга, в мембранах при вращении появляются переменные напряжения. Из-за неравномерного распределения жесткости и веса возникают осевые колебания промежуточного вала. Резонанс может привести к разрушению, такая проблема подробно исследуется на основе МКЭ в [19]. 2. При поломке гибкой мембраны в муфте защитное устройство не сможет передавать крутящий момент. Поэтому, если нагрузка резко уменьшится, турбина двигателя может начать раскручиваться слишком быстро и выйдет из строя.

Выделяются преимущества мембранных муфт по сравнению с другими типами муфт: 1. Высокая гибкость: мембранные муфты способны компенсировать значительные угловые, осевые и радиальные смещения осей валов. Поэтому они пригодны в системах с неидеальной установкой. Сравнительный анализ коэффициентов жёсткости проведён в [20] для разных муфт ГПА. Смещения могут возникать ещё и в работе от тепловых расширений роторов и корпусных деталей агрегата [21]. 2. Легкость конструкции: мембраны могут быть изготовлены из легких, но прочных материалов, что позволяет снизить общий вес конструкции. 3. Мембранные муфты способны передавать значительные крутящие моменты, что делает их подходящими для высоконагруженных систем [16]. 4. Минимальные осевые воздействия на валы [22]. 5. Отсутствие необходимости в смазке. 6. Мембранные муфты могут быть сконструированы для работы в широком диапазоне температур и условий эксплуатации, что видно из обзора [23] мембранных муфт в энергетическом оборудовании.

Поломку муфты может вызвать ряд причин, среди которых немаловажное место занимает вибрация, вследствие которой происходит расцентровка валов. Для поиска собственных частот колебаний исследуемого объекта авторы работы [24] успешно применяют методы математического моделирования, реализуемые в программном комплексе ANSYS. В статье [25] представлены и метод расчета крутильных колебаний вала, и техника их подавления. Необходимо учитывать потенциальные риски, связанные с возможным смещением или перекосом валов, которые соединяются во вращающихся мембранах.

Цель исследования: создать универсальный численный алгоритм для динамического анализа НДС мембранной муфты с промежуточным валом при различных вариантах

несоосности соединяемых валов ГПА с возможностью варьировать значением частоты вращения, свойствами материалов, геометрическими параметрами с автоматическим построением новой 3D модели. Выполнить расчет для проверки поведения муфты, отладить программу с потенциалом исследования резонансных частот колебаний.

Научная значимость исследования состоит в разработке и апробации методики конечно-элементного анализа прочности и долговечности данных узлов ГПА.

Практическая значимость: полученные результаты позволяют оценивать надежность и эффективность работы мембранных муфт, оптимизировать их конструкцию, а также разрабатывать рекомендации по их эксплуатации, что способствует повышению безопасности, снижению затрат на обслуживание и продлению срока службы оборудования газотранспортной системы.

**Материалы и методы (Materials and methods)**

Рассматриваемый агрегат ГПА-16 «Волга» (мощностью 16 МВт), который спроектирован под установку двигателя НК-38СТ, производит ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение» (КМПО). Муфта предназначена для передачи крутящего момента от ротора свободной турбины к валу центробежного нагнетателя агрегата.

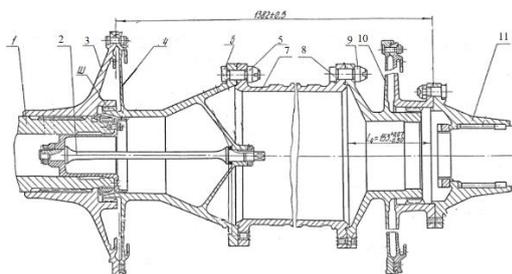


Рис. 2. Муфта мембранная: 1 – вал двигателя; 2 – валик; 3 – фланец вала двигателя; 4 – мембрана передняя; 6,8 – болт; 5,9 – гайка; 7 – вал муфты; 10 – задний мембранный узел; 11 – фланец вала нагнетателя.

Figure 2. Membrane Coupling: 1 – engine shaft; 2 – roller (or shaft); 3 – engine shaft flange; 4 – front membrane; 6, 8 – bolt; 5, 9 – nut; 7 – coupling shaft; 10 – rear membrane assembly; 11 – supercharger shaft flange

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Муфта состоит из следующих основных частей (рис.2): фланца вала двигателя (3), передней мембраны (4), промежуточного вала (7), заднего мембранного узла (10) и фланца вала нагнетателя (11). Крепление передней мембраны и заднего мембранного узла к валу муфты осуществляется призонными болтами (5,8) и самоконтрающимися гайками (6,9). Самоконтращиеся гайки затягиваются крутящим моментом специальным моментным ключом. Передняя мембрана и задний мембранный узел обеспечивают податливость муфты и позволяют компенсировать радиальное смещение и перекос соединяемых валов. Осевое перемещение валов компенсируется мембранным узлом (10). Для предотвращения продольных колебаний муфты передняя мембрана зафиксирована в осевом направлении гибким валиком (2). Мембраны выполнены из титановых сплавов, что позволяет уменьшить массу муфты и снизить осевые усилия. Остальные детали муфты выполнены из коррозионностойких сплавов. Для предотвращения раскрутки вала силовой турбины при аварийном снятии нагрузки и разрушении мембран предусмотрены страховочные шлицы в стыке передней мембраны с фланцем свободной турбины (3) и между дисками заднего мембранного узла. Крутящий момент передается от турбины к нагнетателю напрямую, минуя поврежденные мембраны. В обычном рабочем положении шлицы устанавливаются с гарантированным боковым зазором и не имеет контакта между зубьями. Для сигнализации аварийного режима страховочные шлицы выполнены с эксцентриситетом относительно оси вращения, что обеспечивает гарантированную расцентровку муфты в случае аварийной ситуации и через датчики вибрации и систему аварийной защиты двигатель должен быть остановлен.

Аналитическое решение задачи деформирования муфты, даже без учета контактного взаимодействия, связано с большими математическими трудностями. Поэтому исследование проводится с применением численного метода конечных элементов в ППП «ANSYS» [26, 27], который позволяет оценить напряжённо-деформированное состояние, учесть напряжения от центробежных сил (при частоте вращения более 1000 об/мин их необходимо учитывать), напряжения от температурного расширения и найти баланс: мембрана должна

быть достаточно прочной, чтобы передавать крутящий момент, но и достаточно гибкой, чтобы поглощать вибрации и несоосность валов. Также метод помогает рассчитать, как мембрана будет себя вести под нагрузкой, учитывая её форму и толщину, и предсказать, когда она потеряет устойчивость. Расчётная модель строится с некоторыми упрощениями. Например, страховочные шлицы в мембранном узле игнорируются, так как в обычном рабочем положении шлицы устанавливаются с гарантированным боковым зазором и не имеют контакта между зубьями. Иначе пришлось бы использовать контактные элементы, что добавляет нелинейность задаче [20]. Разбиение на конечные элементы упорядоченное (рис.3). Используемый элемент имеет свойства пластичности, ползучести, изменения жесткости при приложении нагрузок, больших перемещений и больших деформаций. Для контроля скручивания элемента имеется опция интегрирования пониженного порядка. Чтобы упругая мембрана работала эффективно и долго, её края должны плавно переходить в обод и ступицу, при создании геометрической модели скругления необходимы для устранения зон повышенных напряжений и искажения результатов. В работе считается, что муфта идеально соосна с валом двигателя, поэтому в узлах ее крайней левой части (на месте соединения с фланцем вала двигателя левой ступицы и передней мембраны по внешнему радиусу, вала двигателя с осевым валиком муфты) задаются ограничения по перемещениям.

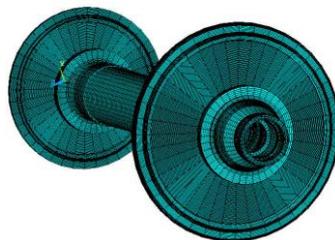


Рис. 3 Упорядоченное разбиение модели на конечные элементы

Fig. 3. Ordered Finite Element Mesh

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

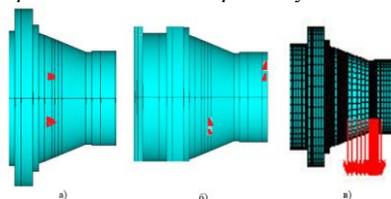


Рис. 4 Моделирование различной несоосности с помощью а) осевых перемещений, б) вертикальных перемещений, г) вертикальных сил

Fig. 4. Simulation of Different Misalignments using a) Axial Displacements, b) Vertical Displacements, c) Vertical Forces

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В работе рассматривается напряжённо-деформированное состояние муфты и оценивается её надёжность с учётом угловой скорости вращения 555 рад/сек в случаях идеальной соосности соединяемых валов, осевого сдвига вала нагнетателя (задаются перемещения по оси OX равные 0,00001, 0,001м), угловой несоосности (задаются на фланце вала нагнетателя перемещения по оси OY равные 0,00001, 0,001м), параллельной несоосности (задаются силы по оси OY равные 100, 250, 500Н), как показано на рис.4. Виды несоосности – на рис.6.

В модели используется три вида материалов (рис. 5): титановый сплав ВТ-8 (мембраны, красный цвет), сталь 15Х12Н2МВФАБ-Ш (вал муфты, синий) и сталь 38ХН3МА (остальная часть, сиреневый цвет). (модули упругости  $E_1=2.15e11$  Па,  $E_2=2.07e11$  Па,  $E_3=1.1e11$  Па, плотности материала  $\rho_1=4500$ ,  $\rho_2=7800$ ,  $\rho_3=7830$  кг/м<sup>3</sup>). Использование более лёгкого титана вместо стали позволяет снизить резонансные частоты муфты при сохранении высокого предела выносливости.

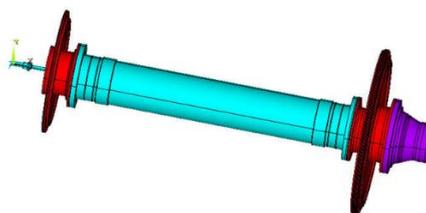


Рис. 5 Распределение используемого материала в модели муфты

Fig. 5. Material Distribution in the Coupling Model

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

**Основы применения МКЭ**

В статическом анализе напрямую задать частоту вращения нельзя, так как он не учитывает временную зависимость. Однако, можно смоделировать центробежные силы, возникающие из-за вращения. Для этого центробежные нагрузки рассчитываются на основе заданной частоты вращения и геометрических параметров модели. Эта нагрузка будет статической и будет включена в решение статической задачи. Полученные результаты будут приближительным представлением напряженно-деформированного состояния при вращении, но не будут учитывать динамические эффекты.

Гармонический анализ позволяет изучить отклик структуры на гармоническое возбуждение, например вращение с постоянной частотой. Здесь частота вращения непосредственно задается как входной параметр анализа, и ANSYS вычисляет отклик структуры на эту частоту. В работе [28] описана такая расчетная схема МКЭ, успешно реализованная для анализа свободных и вынужденных колебаний, резонансных явлений и прочностных свойств в динамической постановке, но без необходимости задавать частоту вращения. В данной задаче частота вращения имеет высокие значения, выгодно использовать и применяется гармонический анализ. Рассмотрим на каких соотношениях он основан. В решении динамической задачи МКЭ принцип виртуальных работ применяется к обобщенным координатам, связанным с перемещениями узлов конечных элементов. Уравнения движения выводятся из условия (1) равенства виртуальной работы внутренних и внешних сил, включая инерционные силы (что делает формулировку эквивалентной принципу Даламбера).

$$\iiint_{\Omega} \rho \{\delta v\}^T \{\ddot{v}\} d\Omega + \iiint_{\Omega} \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} d\Omega - \iiint_{\Omega} \{\delta v\}^T \{Q\} d\Omega - \int_{S_{\sigma}} \{\delta v\}^T \{P\} dS = 0 \tag{1}$$

В уравнении (1)  $\{\delta \varepsilon\}$  — вектор вариаций деформаций,  $\{\delta v\}$  — вектор виртуальных перемещений (смещениям точек тела придали возможные приращения — вариации),  $\{\sigma\}$  — вектор напряжений,  $\{Q\}$  — вектор массовых сил,  $\{P\}$  — вектор поверхностных сил, действующий на части поверхности  $S_{\sigma}$ ,  $\rho$  — удельная плотность, вектор проекций ускорения на оси  $x, y, z$  :  $\left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right\} = \{\ddot{v}\}$ . Два последних слагаемых в (1) — работа внешних сил на возможных перемещениях, второе слагаемое — работа внутренних напряжений на возможных деформациях, в первом слагаемом учитываются силы инерции, равные произведению удельной плотности на ускорение точки.

Решение (1) основывается на решении уравнений движения для каждого конечного элемента конструкции, на которые она разбивается. Вводится для каждого элемента система узлов и узловых перемещений  $\{q(t)\}$ , являющихся в отличие от задач статики функциями времени. Эти уравнения обычно представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, связывающих ускорение, скорость и перемещения узлов конечных элементов с действующими силами:

$$[M] \left\{ \frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} \right\} + [K] \{q(t)\} - \{P(t)\} = 0,$$

где матрица масс  $[M]$  характеризует инерционные свойства исследуемого объекта,  $\{P(t)\}$  — вектор всех узловых сил,  $[K]$  — матрица жёсткости.

Необходимо задать начальные условия, которые должны определять в начальный момент времени поле перемещений и скоростей. После перехода к узловым значениям это условие:

$$\{q(t_0)\} = \{q_0\}, \quad \{\dot{q}(t_0)\} = \{\dot{q}_0\}$$

Уравнения движения для всех конечных элементов объединяются в глобальную систему матричных уравнений. Для решения системы уравнений используются методы численного интегрирования дифференциальных уравнений (такие как метод Ньюмарка, метод Хилла). Используется специализированный программный пакет МКЭ ANSYS.

**Результаты и обсуждения (Results and discussions)**

На основе МКЭ написана программа, которая позволяет увидеть поля интенсивности напряжений. Результаты сравниваются в таблице. При вращении муфты с заданной угловой скоростью при отсутствии несоосности наибольшие напряжения возникают на внешней кромке задней мембраны. В случае моделирования вращения с осевым перемещением вала нагнетателя в сторону муфты наиболее опасные зоны по напряжениям находятся ближе к ступице, на внутреннем радиусе задней мембраны, напряжения меняются не только на заднем мембранном узле, но и на валу муфты (рис.8). В упругой мембране при осевом смещении валов возникает изгиб. Деформированное сечение принимает вид «купола», на рис.8а показаны деформации мембраны в увеличенном масштабе для наглядности.

При сравнении с моделированием угловой (рис.6, б) несоосности вала двигателя и нагнетателя видно, что одинаково опасные зоны по напряжениям расположены в месте соединения задней мембраны со ступичным узлом и на ее внешней кромке у обода (рис.7, табл.).

Анализируя задачу с параллельной (рис.6, а) несоосностью валов, получаем наиболее напряжённые области на передней мембране в месте соединения со ступичным узлом. Но задний мембранный узел тоже нагружен, и максимальные значения интенсивности напряжений появляются на нижней наружной кромке задней мембраны при меньших значениях внешней силы, приложенной на фланце нагнетателя для моделирования перекоса. При небольшом значении силы основная нагрузка приходится на задний мембранный узел, а при увеличении вертикальной силы напряжения «переносятся» на переднюю мембрану (рис. 9,10, табл.). Самое опасное для надёжности муфты – радиальное смещение вала нагнетателя относительно вала двигателя.

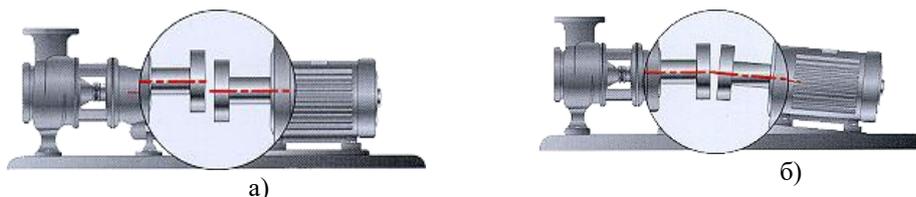


Рис. 6. Виды несоосности: а) параллельная или радиальная; б) угловая или торцевая

Fig. 6. Types of misalignments: a) parallel or radial; b) angular

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Максимальные значения напряжений во всех рассматриваемых случаях деформирования при расчетах не превышают допустимых для используемых материалов. При анализе суммарных векторов перемещений видна работа мембранного узла. Передний ступичный узел муфты не деформируется при всех рассмотренных смещениях вала нагнетателя относительно вала двигателя, остальные детали муфты гасят эти смещения даже при большой скорости вращения.

Т.о., если использовать данную конструкцию, левые и правые мембраны и промежуточный вал, муфта сможет компенсировать не только осевые и угловые смещения валов, но и смещения радиальные, причём допускает гораздо большие отклонения в расположении валов, чем муфта с одной мембраной.

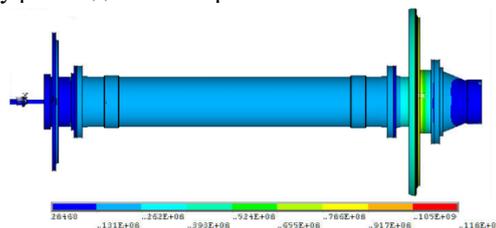
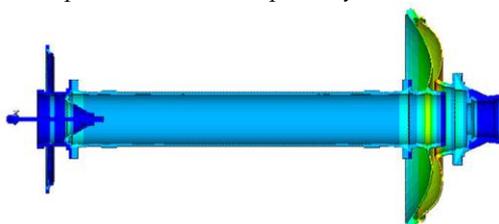


Рис. 7. Поля интенсивности напряжений (Па) при угловой несоосности валов ( $U_y=0.00001$  м)

Fig. 7. Stress intensity fields (Pa) for angular shaft misalignment ( $U_y=0.00001$  m)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



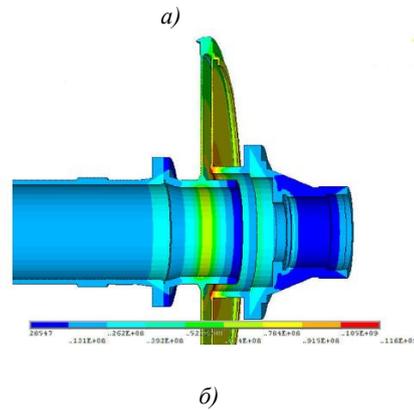


Рис. 8. Распределение полей напряжений (в Па) при осевом перемещении вала нагнетателя  $U_x = -0.00001$  м, а) для всей конструкции с деформированным состоянием в увеличенном масштабе, б) для сечения в области макс. напряжений

Fig. 8. Distribution of stress fields (in Pa) for axial displacement of the supercharger shaft  $U_x = -0.00001$  m, a) for the entire structure with a deformed state on an enlarged scale, b) for the section in the region of maximum stresses

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

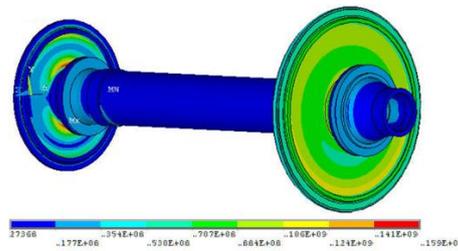


Рис. 9. Поля интенсивности напряжений (Па) при параллельной несоосности валов (вертикальная сила 250 Н)

Fig. 9. Stress intensity fields (Pa) for parallel shaft misalignment (vertical force 250 N)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

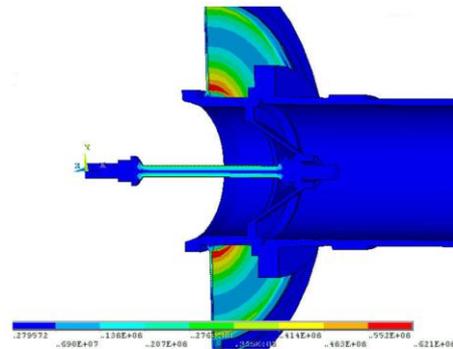


Рис. 10. Поля интенсивности напряжений (Па) при параллельной несоосности валов, max 62 МПа (вертикальная сила 100 Н)

Fig. 10. Stress intensity fields (Pa) for parallel shaft misalignment, max 62 MPa (vertical force 100 N)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

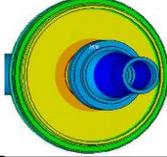
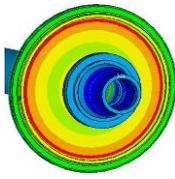
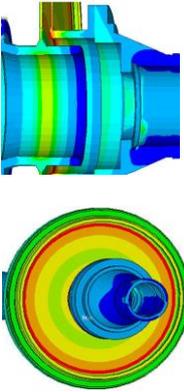
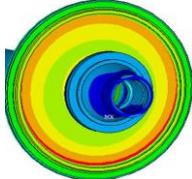
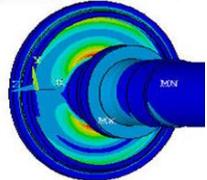
Таблица  
Table

Сравнение значений и зон максимальных напряжений для различных смещений соединяемых валов

Comparison of maximum stress values and zones for different shaft misalignments

	Осевая несоосность валов ( $U_x = -0.00001$ м)	Вращение с идеальной соосностью валов
Максимальная интенсивность напряжений	116 МПа	116 МПа

## Окончание таблицы

Область максимальных напряжений	На внутреннем радиусе задней мембраны в области ступицы (рис.7) 	На внешнем радиусе задней мембраны 
Максимальный суммарный вектор перемещения (R-радиус мембраны)	0,0013R На ободе заднего мембранного элемента. При увеличении осевых смещений вала нагнетателя максимальные суммарные перемещения увеличиваются в месте соединения задних мембран по внешнему радиусу и на фланце нагнетателя	0,006R Около фланца вала нагнетателя
	Угловая несоосность валов $U_y=0.00001$ м	Параллельная несоосность валов
Максимальная интенсивность напряжений	116 МПа	123 МПа при $F_y=100$ Н 159 МПа при $F_y=250$ Н
Область максимальных напряжений	в месте соединения задней мембраны со ступичным узлом и на ее внешней кромке у обода 	При $F_y=100$ Н: (рис.9) В нижней части задней мембраны по внешнему радиусу:  При $F_y=250$ Н: (рис.8) В передней мембране ближе к ступице  Зона максимальных напряжений от заднего мембранного узла переместилась на переднюю мембрану с увеличением $F_y$
Максимальный суммарный вектор перемещений (R-радиус мембраны)	0,006R Около фланца вала нагнетателя и на внутреннем радиусе задней мембраны	0,02R при $F_y=100$ Н 0,05R при $F_y=250$ Н Около фланца вала нагнетателя и по всей поверхности задней мембраны

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Построенный численный алгоритм даёт возможность быстро определять предельные нагрузки и перемещения, варьировать значением частоты вращения, размерами, свойствами материалов, граничными условиями, оценивать НДС и прочность всей конструкции с выявлением опасных зон, что значительно снижает риски и повышает эффективность работы газоперекачивающих агрегатов.

**Заключение (Conclusions)**

Численное решение показывает, что заявленные свойства рассматриваемой мембранной муфты на различных режимах эксплуатации, а именно ее способность

компенсировать осевые и угловые, радиальные смещения, подтвердилась. Написанная программа для исследования мембранных муфт остается актуальной в связи с их широким применением в различных отраслях, особенно в энергетике, и может сэкономить время и ресурсы, связанные с ремонтом и заменой муфт, а также улучшить безопасность и надежность работы газотранспортного оборудования. Результатом применения программы является возможность создания новых конструкций муфты, используемой в ГПА.

Данная задача напрямую связана со снижением уровня вибронагруженности быстроходных роторных машин, т.к. для определения параметров колебания валопроводов требуется способ определения жесткостей таких муфт, а для определения радиальной и угловой жесткости необходимы параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) муфт с разным количеством, разным материалом и разными размерами и формами мембран.

В перспективе развития темы - добавить в написанной программе анализ напряжений от переменной (циклической) составляющей крутящего момента, обусловленной крутильными колебаниями валопровода; построить математическую модель свободных и вынужденных колебаний валопровода с учётом демпфирования опор.

#### Литература

1. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022; 24(3):130-143. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143>
2. Пахомов С. А., Маслов И. Н. Механика конструкций в COMSOL Multiphysics // Инновационные идеи молодых исследователей : Сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2023. – С. 63-66. – EDN ХМКТGM.
3. Sultanov L. U., Mityaikin V. I., Shuvalov V. A. [et al.] Study of Local Strength of Tail Rotor Blade under Ground and Flight Loads // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67, No. 2. – P. 255-262. – DOI 10.3103/S1068799824020053. – EDN ЕРНКВА.
4. Титов А. В., Осипов Б.М., Николаева Н. В. Представление характеристик узлов в математической модели газотурбинной установки // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2017. – № 2(34). – С. 43-49. – EDN ZTEJWF.
5. Менделеев Д. И., Марьин Г. Е., Ахметшин А. Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 3(43). – С. 47-56. – EDN MBLKLL.
6. Ютанова А. А., Клейдман М.Д. Анализ НДС на основе МКЭ цельнокованого ротора турбины при действии эксплуатационных нагрузок с учётом дефектов в осевом канале // XXVI Всероссийский аспиран.-магист. научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов : в 3 т., Казань, 06–07 декабря 2022 года. Том 2. – Казань: КГЭУ, 2023. – С. 184-187.
7. Новикова М.В., Хрусталева В.А. Эффективность внепикового энергообеспечения электропривода ГПА в регионах с высокой долей АЭС. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(1-2):37-45.
8. Иванов А. И., Спирин А. С. Характерные особенности валопроводов газоперекачивающих станций // Наука и военная безопасность. – 2016. – № 4(7). – С. 81-86. – EDN XXBGKB.
9. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №3(158). С. 84-92.
10. Тимофеева С. С., Хизбуллин А. Р., Мингалеева Г. Р. Оценка возможности применения газоперекачивающего агрегата для транспортировки технологического газа // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 4(52). – С. 76-87. – EDN PLAXCQ.
11. Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024;26(1):131-143.
12. Dai H. M. et al. Use of Finite Element Method Software to Assess the Safety of a Newly Designed Electric Motorcycle Frame //Sensors & Materials. – 2024. – Т. 36.
13. Liao M., Zhang L., Nong S., Zhang C., Zhu R., & Chen W. Study on the Effect of Cracks in Diaphragm Couplings on the Dynamic Characteristics of Shaft System// Machines. –2024. 12(10), 741.
14. Фирсов Е. П., Ряховский О. А., Гуськов А. М., Билецкий Е. О. Особенности проектирования упругой компенсирующей муфты. Часть 1. Расчёт упругого элемента при соосном расположении валов// Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – № 12. – С. 5.
15. Qiu, Z., Qiqi, H., Han, Z., and Zhang, F. (2020). A kind of perforated diaphragm coupling and its design method. // Liaoning Province. 2020 – CN110953257A.

16. Граков С. А., Бохан В. В., Зубарев А. В., Бобров С. П. Основные принципы конструирования и расчёта компенсирующих полужёстких мембранных металлических муфт // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического ун-та. – 2019. – Т. 1, № 4(40). – С. 37-45.

17. Граков С. А., Бохан В. В., Ильичев В. А., Бобров С. П. Потеря устойчивости мембранной муфты с переменным сечением при действии крутящего момента // Проблемы машиноведения: материалы III Междунар. науч.-технической конф., Омск, 2019. Часть I. – Омский государственный технический университет. – С. 86-91. – EDN WAYQGR.

18. Захаров А. Г., Будусов В. Г., Ю. П. Мягих, Г. Ф. Кислицын. Патент № 2152544 С1 Российская Федерация, МПК F16D 9/00. устройство для передачи вращения между валами: № 98122301/28: заявл. 07.12.1998: опубл. 10.07.2000 /заявитель Открытое акционерное общество Научно-производственное объединение "Искра". – EDN HWAGXZ.

19. Клейдман О. В., Клейдман М. Д. Анализ свободных и вынужденных колебаний сосудов и баллонов высокого давления из композитных материалов на основе МКЭ. Подогреватель высокого давления и ресивер водорода // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022 (МНТК "ИМТОМ - 2022"): Матер. XI-й Междунар. научно-технической конференции, Казань, 2022. Том Часть 2. – Акционерное общество "Казанский научно-исслед. институт авиационных технологий. – С. 189-191. – EDN ПWNMZ.

20. Сидоров И.Н., Горелов А.В., Булашов Д.А. Вычисление и сравнительный анализ коэффициентов жесткости пластинчатых и мембранных соединений муфт газоперекачивающих агрегатов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. №2. – С.28-35.

21. Паранук А. А. и др. Разработка методики диагностирования узлов газоперекачивающего агрегата по данным вибродиагностики //Современные наукоемкие технологии. – 2021. – №. 6-2. – С. 270-276.

22. Cheng, S., Wang, G. P., Liu, J. X., & Yan, F. F. (2022, September). Research on torsional characteristics of closed interference fit diaphragm coupling. In *International Conference on Mechanical Design and Simulation (MDS 2022)* (Vol. 12261, pp. 284-290). SPIE.

23. Wang G. et al. The diaphragm coupling in energy equipment: A review / G. Wang, J. Liu, Sh. Cheng [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. – 2022. – Vol. 10. – DOI 10.3389/fenrg.2022.1001315. – EDN YHOFGO.

24. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020; 22(6):188-201

25. Wang J. et al. Torsional vibration characteristics analysis and vibration suppression research of compressor flexible rotor system considering fit clearance // *Multibody System Dynamics*. – 2024. – 1-30.

26. Dai H. M., Chen B. H., Hsu C. M., Lin C. L., & Yang C. F. Analyses of Full-load, Modal, and Fatigue Life of Electric Motorcycle Frame Using Finite Element Software ANSYS // *Sensors and Materials*. – 2023. 35(8), 2817-2829.

27. F. Hu, Q. He, B. Fu [et al.] Reliability Analysis of Diesel Engine Connecting Rod Threaded Connection Based on ANSYS // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2459, No. 1. – P. 012095. – DOI 10.1088/1742-6596/2459/1/012095. – EDN KUHUYKE.

28. Marin, G. E., Kleidman, O. V., Ilyushin, P. V., & Akhmetshin, A. R. (2025). Analysis of stress-strain state of hydrogen receiver casing // *International Journal of Hydrogen Energy*, 98, 1366-1373.

#### Авторы публикации

**Клейдман Ольга Владимировна** – канд. физ.– мат. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

ORCID\*: <http://orcid.org/0009-0003-0434-4134>. Email: [olgakdpm@mail.ru](mailto:olgakdpm@mail.ru).

**Маслов Игорь Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Email: [ig-mas@mail.ru](mailto:ig-mas@mail.ru).

**Николаева Надежда Владимировна** – канд. физ.– мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Email: [navlnic@rambler.ru](mailto:navlnic@rambler.ru).

## References

1. Basenko V.R., Nizamiev M.F., Ivshin I.V., Vladimirov O.V. 3D model of a power transformer to study its technical condition by oscillation parameters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):130-143. (In Russ.)
2. Pakhomov S. A., Maslov I. N. Structural Mechanics in COMSOL Multiphysics // Innovative ideas of young researchers: Collection of scientific articles based on the materials of the XII International scientific and practical conference - Ufa: Limited Liability Company "Scientific Publishing Center" Vestnik Nauki ", 2023. - P. 63-66. (In Russ.)
3. Sultanov L. U., Mitryaikin V. I., Shuvalov V. A. [et al.] Study of Local Strength of Tail Rotor Blade under Ground and Flight Loads // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67, No. 2. – P. 255-262. – DOI 10.3103/S1068799824020053. – EDN EPHKBA.
4. Titov A.V., Osipov B.M., Nikolaeva N.V. Representation of characteristics of nodes in mathematical model of gas turbine. *Kazan state power engineering university bulletin*. 2017. № 2(34). P. 43-49. (In Russ.)
5. Mendeleev D. I., Maryin G. E., Akhmetshin A. R. Performance characteristics of the combined cycle power regime ccp-110 mw at partial loads. *Kazan state power engineering university bulletin*. 2019. V. 11, № 3(43). P. 47-56. (In Russ.)
6. Yutanova A. A., Kleidman M. D. Analysis of the stress-strain state based on the FEM of a solid-forged turbine rotor under operational loads, taking into account defects in the axial channel // XXVI All-Russian postgraduate and master's scientific seminar dedicated to the Day of Power Engineer: materials of reports: in 3 volumes, Kazan, December 06-07, 2022. Volume 2. - Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2023. - P. 184-187. (In Russ.)
7. Novikova M.V., Khrustalev V.A. Efficaciousness offpick power supply input electrical drive GPU in regions with high fraction NPS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(1-2):37-45. (In Russ.)
8. Ivanov A.I., Spirin A.S. Features of shaft assemblies for gas compressor stations. *Science and military security*. 2016; № 4(7). P. 81-86. (In Russ.)
9. Marin G.E., Osipov B.M., Akhmetshin A.R. Research of the application of hydrogen as a fuel to improve energy and environmental performance of gas turbine plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(2): 84-92. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-84-92. (In Russ.)
10. Timofeeva S.S., Khizbullin A.R., Mingaleeva G.R. Thermochemical processing of low-grade peat based on gasification. *Kazan state power engineering university bulletin*. 2021. V. 13, № 4(52). P. 76-87. (In Russ.)
11. Novoselova M.S., Mingaleeva G.R., Marin G.E., Titov A.V. Perspectives of using syngas in gas turbine plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(1):131-143. (In Russ.)
12. Dai, H. M., Chen, B. H., Hsu, C. M., Lin, C. L., Tseng, H. W., & Yang, C. F. Use of Finite Element Method Software to Assess the Safety of a Newly Designed Electric Motorcycle Frame. *Sensors & Materials*, 2024. 36.
13. Liao M., Zhang L., Nong S., Zhang C., Zhu R., & Chen W. Study on the Effect of Cracks in Diaphragm Couplings on the Dynamic Characteristics of Shaft System. *Machines*. 2024. 12(10), 741.
14. Firsov E. P., Ryakhovsky O. A., Guskov A. M., Biletsky E. O. Features of designing an elastic compensating coupling. Part 1. Calculation of an elastic element with coaxial shafts // Science and education: scientific publication of Bauman Moscow State Technical University. 2010. № 12. P. 5-16. (In Russ.)
15. Qiu, Z., Qiqi, H., Han, Z., and Zhang, F. (2020). A kind of perforated diaphragm coupling and its design method. // Liaoning Province. 2020 – CN110953257A.
16. Grakov S. A., Bokhan V. V., S. P. Bobrov, A. V. Zubarev. Basic principles of design and calculation of compensating semi-rigid membrane metal couplings. *Scientific notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University*. 2019. V. 1, № 4(40). P. 37-45. (In Russ.)
17. Grakov S. A., Bokhan V. V., Il'ichev V. A., Bobrov S. P. Loss of stability of the membrane coupling with variable cross-section under the torque. *Problems of mechanical engineering: Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference, Omsk. 2019. Part I. – Omsk State Technical University. – P. 86-91. (In Russ.)*
18. Zakharov A.G., Budusov V.G., Mjagkikh Ju.P., Kislitsyn G.F. Device for imparting shaft-to-shaft rotation. RU (11) 2 152 544(13) C1. F 16 D 9/00. Abstract of invention. Application: 98122301/28, 07.12.1998.) Applicant(s): Otkrytoe aktsionerное obshchestvo Nauchno proizvodstvennoe ob"edinenie "Iskra".
19. Kleidman O. V., Kleidman M. D. Analysis of free and forced vibrations of high-pressure vessels and cylinders made of composite materials based on FEM. High-pressure heater and hydrogen receiver // Innovative engineering technologies, equipment and materials - 2022 (MNTK "IMTOM - 2022"): Proc. XI-th International. scientific and technical conference, Kazan, 2022. Volume Part 2. - Joint-Stock Company "Kazan Research Institute of Aviation Technologies. - P. 189-191. (In Russ.)

20. Sidorov I.N., Gorelov A.V., Bulashov D.A. The calculation and comparative analysis coefficients of stiffnesses of plate and membrane connections of couplings of gas-pumping units. *Scientific and technical bulletin of the volga region*. 2017. №2. – P.28-35. (In Russ.)

21. Paranuk A. A. et al. Development of the methodology of diagnostics of the gas pumping unit nodes according to the vibrodiagnostic data. *Modern knowledge-intensive technologies*. 2021. №. 6-2, P. 270-276. (In Russ.)

22. Cheng, S., Wang, G. P., Liu, J. X., & Yan, F. F. (2022, September). Research on torsional characteristics of closed interference fit diaphragm coupling. In *International Conference on Mechanical Design and Simulation (MDS 2022)* (Vol. 12261, pp. 284-290). SPIE.

23. Wang G. et al. The diaphragm coupling in energy equipment: A review / G. Wang, J. Liu, Sh. Cheng [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. – 2022. – Vol. 10. – DOI 10.3389/fenrg.2022.1001315. – EDN YHOFGO.

24. Shakurova R.Z., Gaponenko S.O., Kondratiev A.E. Technique for operational diagnosis of pipelines of energy systems and complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):188-201. (In Russ.)

25. Wang J. et al. Torsional vibration characteristics analysis and vibration suppression research of compressor flexible rotor system considering fit clearance. *Multibody System Dynamics*. 2024. 1-30.

26. Dai H. M., Chen B. H., Hsu C. M., Lin C. L., & Yang C. F. Analyses of Full-load, Modal, and Fatigue Life of Electric Motorcycle Frame Using Finite Element Software ANSYS. *Sensors and Materials*. – 2023. 35(8), 2817-2829.

27. F. Hu, Q. He, B. Fu [et al.] Reliability Analysis of Diesel Engine Connecting Rod Threaded Connection Based on ANSYS // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2459, No. 1. – P. 012095. – DOI 10.1088/1742-6596/2459/1/012095. – EDN KUHUYKE.

28. Marin, G. E., Kleidman, O. V., Ilyushin, P. V., & Akhmetshin, A. R. (2025). Analysis of stress-strain state of hydrogen receiver casing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 98, 1366-1373.

#### **Authors of the publication**

**Olga V. Kleidman** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0009-0003-0434-4134>. Email: [olgakdpm@mail.ru](mailto:olgakdpm@mail.ru)

**Igor N. Maslov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: [ig-mas@mail.ru](mailto:ig-mas@mail.ru).

**Nadezhda V. Nikolaeva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: [navlnic@rambler.ru](mailto:navlnic@rambler.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** 16.03.2025 г.

**Отредактировано** 27.03.2025 г.

**Принято** 13.05.2025 г.



## ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО - КАК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННЫМ ВИДАМ ТОПЛИВА

Зверева <sup>1</sup> Э.Р., Марьин <sup>1</sup> Г.Е., Ахметова <sup>1</sup> И.Г., Щаулов <sup>2,3</sup> В.В., Юсупов <sup>2,3</sup> К.Н.

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>НПО Б энд Индастриз, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальные Энергетические Технологии, г. Москва, Россия

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке концепции перехода на водородное топливо системы теплоснабжения Мурманской области. Мурманская область, обладает уникальными природными ресурсами и тяжелыми климатическими условиями, и представляет собой уникальный регион для внедрения водородных технологий. В статье представлены результаты моделирования работы ветровых электростанций (ВЭС), прогнозируемые мощности генерации, перспективы использования водорода в системе теплоснабжения Мурманской области. В данной работе рассматриваются возможности использования «зеленой» электроэнергии, получаемой от ВИЭ - атомных, ветровых и гидроэлектростанций, с целью замены традиционных топлив, таких как дизельное топливо и мазут. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблему топливообеспечения в Мурманской области. Разработать технологию получения водородного топлива, с последующим сжиганием на действующем энергетическом оборудовании региона. МЕТОДЫ. Для моделирования режимов работы оборудования использована программа Winpro, с последующей почасовой выкладкой мощности в программном комплексе Smartren. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведенное исследование показало возможность модернизации существующей инфраструктуры, включая котельные и электрические сети, для внедрения водородных технологий. Например, предлагается совместное сжигание водорода с традиционными видами топлива, что позволит уменьшить удельные расходы углеводородных топлив, снизить углеродный след и объем вредных выбросов. В работе также анализируется производимый углеродный след, образующийся от сжигания различных видов топлива, и «зеленый» водород демонстрирует здесь значительное преимущество. Показано, что переход на водородные технологии может не только улучшить экологическую ситуацию в Мурманской области, но и стать экономически выгодным решением, способствующим привлечению инвестиций и развитию новых технологий в регионе. Водород может частично заменить традиционное топливо в виде мазута, если учесть транспортировку мазута до котельной, его топливоподготовку и выбросы от использования мазута, то стоимость водорода будет конкурентоспособной. Таким образом, данное исследование на примере Мурманской области, показывает перспективность внедрения водородных технологий для устойчивого развития региона.

**Ключевые слова:** водород; топливо; мазут; зеленая энергетика; водородная энергетика; ВЭС; альтернативное топливо.

**Для цитирования:** Зверева Э.Р., Марьин Г.Е., Ахметова И.Г., Щаулов В.В., Юсупов К.Н. Водородное топливо - как альтернатива традиционным видам топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 187 -197. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-187-197.

## HYDROGEN FUEL - AN ALTERNATIVE TO TRADITIONAL FUELS

Zvereva<sup>1</sup> E.R., Marin<sup>1</sup> G.E., Akhmetova<sup>1</sup> I.G., Shchaulov<sup>2,3</sup> V.V., Yusupov<sup>2,3</sup> K.N.

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>NPO B and Industries, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Energy Technologies, Moscow, Russia

**Abstract:** The relevance of the research lies in the development of a concept for transitioning to hydrogen fuel in the heating supply system of the Murmansk region. The Murmansk region

*possesses unique natural resources and harsh climatic conditions, making it an exceptional area for the implementation of hydrogen technologies. The article presents the results of modeling the operation of wind power plants (WPP), projected generation capacities, and the prospects for using hydrogen in the heating supply system of the Murmansk region. This work examines the possibilities of utilizing "green" electricity generated from renewable energy sources—nuclear, wind, and hydroelectric power plants—to replace traditional fuels such as diesel and fuel oil. Objective: To address the fuel supply issue in the Murmansk region and develop a technology for producing hydrogen fuel, followed by its combustion in the region's existing energy equipment. Methods: The Winpro software was used for modeling the operational modes of equipment, with subsequent hourly power distribution in the Smartren software suite. Results: The conducted research demonstrated the feasibility of modernizing the existing infrastructure, including boiler houses and electrical networks, for the implementation of hydrogen technologies. For example, co-combustion of hydrogen with traditional types of fuel is proposed, which will reduce the specific consumption of hydrocarbon fuels, lower the carbon footprint, and decrease harmful emissions. The study also analyzes the carbon footprint generated from the combustion of various types of fuel, showing that "green" hydrogen has significant advantages in this regard. It is shown that the transition to hydrogen technologies can not only improve the environmental situation in the Murmansk region but also become an economically viable solution that attracts investments and fosters the development of new technologies in the region. Hydrogen can partially replace traditional fuel in the form of fuel oil; considering the transportation of fuel oil to the boiler house, its fuel preparation, and emissions from fuel oil use, the cost of hydrogen will be competitive. Thus, this research, using the example of the Murmansk region, demonstrates the potential for implementing hydrogen technologies for the sustainable development of the region.*

**Keywords:** hydrogen; fuel; fuel oil; green energy; hydrogen energy; WPP; alternative fuel.

**For citation:** Zvereva E.R., Marin G.E., Akhmetova I.G., Shchaulov V.V., Yusupov K.N. Hydrogen fuel - an alternative to traditional fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 187-197. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-187-197.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время в мире и в Российской Федерации наблюдается повышение спроса на электроэнергию, спрос на возобновляемые источники энергии усиливается, при этом удаленные и изолированные районы сталкиваются с двойной проблемой, растущим спросом на энергию и ограниченным доступом к энергосистеме. Несмотря на то, что в Российской Федерации пока более распространены традиционные источники энергии, ветроэнергетика с ее масштабируемостью и низким воздействием на окружающую среду может быть использована в удаленных регионах, таких как Мурманская область [1-3]. По прогнозам, к 2028 году на долю возобновляемых источников энергии будет приходиться более 42% мирового производства электроэнергии [4,5].

Особенностью территории Российской Федерации является то, что удаленные районы и труднодоступные территории занимают большие площади. Для данных территорий, характеризующихся сложными климатическими условиями и низкой плотностью населения, энергоснабжение обеспечивается преимущественно тепловыми станциями и котельными, работающими на привозном топливе, таком как дизельное топливо, мазут и уголь. Это обуславливает более высокую стоимость электроэнергии по сравнению со среднероссийскими показателями [6].

Мурманская область находится в крайнем северо-западном углу европейской части России и включает Кольский полуостров, а также соседние западные и юго-западные территории материка. Площадь данного региона составляет 145 тысяч квадратных километров. Он богат природными ресурсами и полезными ископаемыми, среди которых наибольшее значение для экономики имеют медно-никелевые, железные и апатитонефелиновые руды, слюда, а также сырьё для строительных материалов и керамики, включая облицовочный камень. Существенную роль в экономике области играет рыболовство и переработка рыбы, выловленной в северных морях, открытом океане и внутренних водоёмах. Тем не менее, освоение природных ресурсов региона сталкивается с рядом серьезных трудностей. Существуют различные природные, экономические, технические и социальные факторы, которые затрудняют развитие этого района. К основным из них относятся суровые климатические условия, удалённость от центральных районов, низкая плотность населения и недостаточно развитая транспортная сеть. Климат

Мурманской области определяется её географическим положением за северным Полярным кругом, что приводит к довольно суровым погодным условиям. Значительное влияние на климат оказывает тёплое океаническое течение Гольфстрим, достигающее берегов Баренцева моря. В результате зима в этом регионе относительно мягкая, но длительная (до 7-8 месяцев), а лето короткое и прохладное. Особенности ветрового режима также являются характерной чертой климата Мурманской области. Зимой часто наблюдаются штитль, который может резко сменяться сильными ветрами со скоростью более 10-15 м/с. Эти климатические условия способствуют повышенным потребностям в тепловой энергии, поэтому отопительный сезон в регионе длится 8-9 месяцев в году, а в некоторых населённых пунктах на побережье Баренцева моря может достигать 11-12 месяцев.

Важно отметить, что в Мурманской области отсутствуют предприятия по добыче, переработке и получение углеводородных видов топлива (угля, нефти, мазута, дизельного топлива). Поэтому для производства тепловой и электрической энергии используется привозное топливо, либо электроэнергия [7]. В таблице 1 представлен топливно-энергетический баланс региона в период до 2025-2030 год.

Таблица 1  
Table 1

Топливо-энергетический баланс Мурманской области  
*Fuel and energy balance of the Murmansk region*

	Топливо, тыс.тут		
	Уголь	Нефтепродукты	Прочее
Электроэнергетика	150,8	5,7	0
Котельные	180,2	878,2	0
ТЭЦ	115,2	224,7	0,5
Всего	446,2	1108,6	0,5
Доля в ТЭБ, %	28,69	71,28	0,03

\*Источник: Прогнозный ТЭБ Мурманской области на период до 2030 года

Как видно из таблицы 1 в топливно-энергетическом балансе Мурманской области преобладают нефтепродукты -мазут и дизельное топливо, на долю угля приходится менее 25%, доля прочих топлив, включая ВИЭ незначительна, так как эти направления только начинают развиваться в регионе.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

#### **Оценка перспектив развития водородной энергетики в Мурманской области**

В последние годы прослеживается рост интереса к водородной энергетике. В 2016 году подписано Парижское соглашение, что привело к принятию новых законов, направленных на снижение углеродного следа. 4 ноября 2020 года Президентом РФ подписан Указ №666 «О сокращении выбросов парниковых газов», согласно которому к 2030 году предусмотрено сокращение выбросов CO<sub>2</sub> на 30% от уровня 1990 года, а в 2050 году предполагается сделать российскую экономику полностью низкоуглеродной. Для развития безуглеродной энергетики в России планируется ввести дополнительные меры, направленные на стимулирование снижения выбросов парниковых газов.

Для Мурманской области характерен арктический и субарктический климат, поэтому он представляет собой уникальный регион с особыми климатическими условиями и значительным потенциалом для развития гидроэлектростанций, ветроэнергетики. Суммарная мощность электростанций региона составляет порядка 3500 МВт (Кольская АЭС 1760МВт, малые ГЭС 300 МВт, тепловые электрические станции, Апатитская ТЭЦ, Мурманская ТЭЦ, ТЭЦ АО «Ковдорский ГОК», Кислогубская ПЭС, ветропарк Кольской ВЭС), при этом максимум потребления составляет порядка 1900 МВт. Тепловые электрические станции и котельные составляют основу теплоснабжения региона. Для арктических территорий России характерны ограничения, связанные с транспортной и энергетической отраслью. Основным видом топлива здесь остается мазут, на рис. 3 показана топливная структура потребления топлива. Особенностью использования мазута является сложная система топливоподготовки, хранения и доставки до потребителя, выбросы оксидов серы, а также дороговизна топлива [8,9]. Основными потребителями тепловой энергии являются города, поселки и промышленные предприятия.

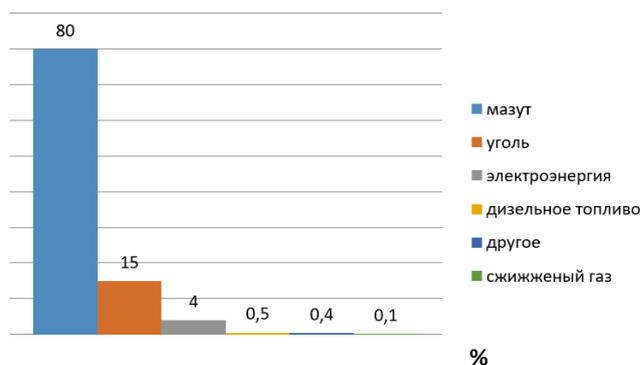


Рис.1 - Структура расхода топлива на генерацию электрической и тепловой энергии Fig. 1 - The structure of fuel consumption for the generation of electrical and thermal energy

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Мурманская область имеет существенный резерв по электрической энергии, который можно использовать для модернизации системы отопления, но для этого необходимо провести серьезную модернизацию электрических сетей, что в суровых климатических условиях является дорогостоящим мероприятием. Например, замена традиционных котельных на мазуте на современные электрические котлы потребует не только постройки новых корпусов, переноса, подвода к ним действующих тепловых трасс, но и модернизации и строительства новых электрических сетей с дублированием (ЛЭП и силовые трансформаторы). Поэтому использование водородных технологий в качестве альтернативы традиционному углеводородному топливу является перспективным направлением [10-12].

Создание в Мурманской области водородного полигона неоднократно планировалось, но на данный момент единственным регионом, в котором утверждено создание водородного полигона является Сахалинская область, где наряду с крупными проектами госкорпорации «Росатом», ОАО «РЖД» создается водородный кластер.

В настоящий момент полностью заменить мазут на водород не представляется возможным, так как устаревшее энергетическое оборудование котельных не сможет работать полностью, на 100% на водородном топливе, для этого необходимо будет заменить практически все действующее оборудование, поэтому перспективным направлением будет совместное сжигание нескольких видов топлива.

#### **Потенциал выработки электроэнергии на ВЭС**

Работа ветровых электростанций (ВЭС) с учетом стохастической природы ветра характеризуется изменчивостью и непредсказуемостью выработки электроэнергии, что обусловлено колебаниями скорости и направления ветра. Эти изменения играют ключевую роль в определении эффективности функционирования ВЭС. Для прогнозирования вероятных сценариев выработки энергии используются такие методы, как временные ряды и модели Монте-Карло, что позволяет более точно оценивать генерацию электроэнергии [13-14]. В данном исследовании анализируется работа Кольской ВЭС, где суммарная мощность 57 ветроэлектрических установок составляет 201 МВт. В рамках исследования выполнено прогнозирование работы ВЭС, произведена оценка потенциала выработки электроэнергии. Для моделирования режимов работы оборудования использована программа Winpro, с последующей почасовой выкладкой мощности в программном комплексе Smartren.

Исходные данные для моделирования:

- мощность ВЭС (аттестуемая) – 201 МВт;
- мощность ВЭУ G132 – 3,55МВт;
- количество ВЭУ - 57 шт.;
- место установки оборудования - Мурманская область.

Расчетная мощность ВЭУ определяется по следующему соотношению:

$$P_{вэу} = C_p * \frac{\rho * v^3}{2} * \frac{\pi * D^2}{4} * \eta_{эл} * \eta_{мех}, \quad (1)$$

где  $P_{вэу}$  - мощность ВЭУ, Вт;

$C_p$  – коэффициент мощности установки;

$\rho$  – плотность воздуха, изменяется сезонно, зависит от давления и температуры, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость ветра, м/с;

$D$  – диаметр ветроколеса, м;

$\eta_{эл}$  – КПД генератора;

$\eta_{мех}$  – КПД ветроустановки.

Согласно исследованиям EWEA, Андерсона, Beurskens and Jensen для расчета количества, вырабатываемой электроэнергии в год, можно использовать следующее соотношение:

$$\mathcal{E} = K * V_m^3 * A_t * N, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}$  – величина, вырабатываемой электроэнергии в год, кВт\*ч;

$K$  – численный коэффициент, учитывающий значение средней скорости и частоту изменения скорости ветра;

$V_m$  – среднегодовая скорость ветра через сечение поверхности, образуемая лопастями ветротурбины, м/с;

$A_t$  – сечение поверхности, образуемой лопастями ветротурбины, м<sup>2</sup>;

$N$  – число ВЭУ, шт.

На рисунке 2 показано расположение ВЭУ на территории Мурманской области.

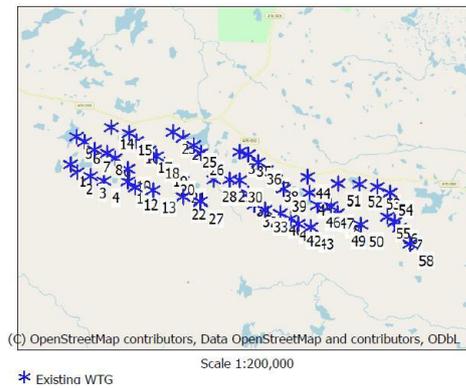


Рис. 2 - Расположение ВЭУ

Fig. 2 - Wind turbine location

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По итогам моделирования были получены следующие результаты: годовая выработка электроэнергии составила 735 689 МВт·ч, при этом коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) достиг значения 41,7%. На рисунке 3 представлены распределения скорости ветра и распределение по закону Вейбулла. Закон Вейбулла представляет собой статистическую модель, которая описывает распределение вероятностей для разных типов данных, включая скорость ветра. Этот закон широко применяется в ветроэнергетике для анализа и прогнозирования ветровых ресурсов. Закон Вейбулла позволяет оценить среднюю скорость ветра и его колебания на конкретной территории, что является важным для проектирования ветровых электростанций. Применение этого распределения помогает определить наиболее подходящие места для установки ветряных турбин, прогнозировать выработку электроэнергии и оценивать риски, связанные с изменениями в ветровых условиях. Таким образом, распределение ветровой нагрузки и закон Вейбулла играют ключевую роль в эффективном использовании ветровых ресурсов и обеспечении надежности работы ветровых электростанций.

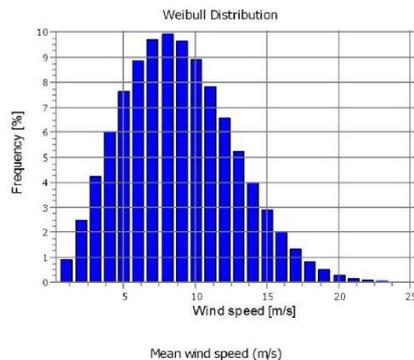


Рис. 3 - Распределение ветровой нагрузки

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

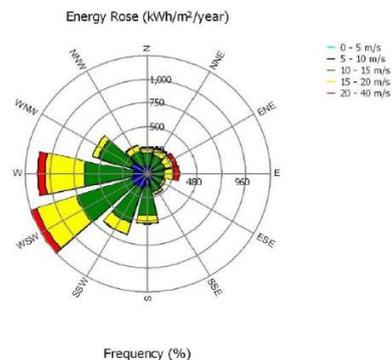


Fig. 3 - Wind load distribution

В результате моделирования получен средний КИУМ в 38%, что позволяет говорить о среднегодовой выработке порядка 80 МВт. Выработка электроэнергии на ВЭС непостоянно и зависит от многих факторов, поэтому по результатам моделирования были сделаны предположения, что среднечасовое распределение мощности Кольской ВЭС показывает, что в 75 % времени среднечасовая мощность Кольской ВЭС будет более 29 МВт, в 50% - более 73,7 МВт, в 25 % - более 121,6 МВт.

#### *Обсуждения (discussions)*

#### **Оценка перспектив использования водорода**

В настоящий момент производство водорода на изолированных территориях возможно в основном с помощью электролиза. Электролиз водорода представляет собой процесс разложения воды на водород и кислород с использованием электрического тока [15,16]. Этот метод считается одним из наиболее эффективных способов получения чистого «зеленого» водорода, который может применяться в различных сферах, включая энергетику, металлургию, нефтепереработку, химию, пищевую промышленность и транспорт и др.

Процесс электролиза включает несколько ключевых этапов. Сначала вода очищается, и готовится раствор, в котором она обычно смешивается с электролитом (например, щелочным или кислотным раствором) для повышения проводимости. Установка состоит из двух электродов — анода и катода, которые помещены в электролит. При прохождении электрического тока через воду на аноде происходит окисление, а на катоде — восстановление. На аноде происходит реакция:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ , а на катоде:  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$ . В результате из воды выделяются молекулы водорода и кислорода.

Преимущества электролиза включают его экологическую чистоту, поскольку при правильной организации процесса он может быть полностью безуглеродным, «зеленым», если используются возобновляемые источники энергии. Получаемый водород обладает высокой степенью чистоты, что делает его пригодным для различных промышленных производств [17]. Кроме того, процесс можно масштабировать, начиная от небольших установок и заканчивая крупными промышленными системами.

Основным документом для оценки потенциала использования водорода в системе теплоснабжения является Схема теплоснабжения муниципального образования г. Мурманск на период с 2019 по 2039 годы. В пределах города функционирует один крупный источник комбинированной выработки тепловой и электрической энергии — Мурманская ТЭЦ, а также 11 отопительных котельных и 1 промышленно-отопительная котельная. Централизованное теплоснабжение охватывает более 90% потребителей жилищного фонда. Основным и резервным топливом на всех источниках является мазут марки М-100 с теплотой сгорания около 8937 ккал/кг, аварийное топливо не предусмотрено. Топливо доставляется на источники с помощью железнодорожного транспорта, а подъездные пути и склады для хранения принадлежат АО «Мурманская ТЭЦ».

В настоящее время производство водородного топлива можно осуществлять как на площадке производителя электроэнергии, так и непосредственно на месте потребления водорода. Произведенный водород необходимо по трубопроводам направить на сжатие, так как хранение необходимо производить при высоком давлении (15,35 или 70 МПа), далее специальным транспортом доставить потребителю. Побочным продуктом при получении водорода является кислород высокой чистоты, который также будет собран и отправлен потребителю (например, медицинским учреждениям). Для примера рассмотрим потребителя, с постоянным расходом водорода 30 м<sup>3</sup>/ч. Для транспортировки до потребителя понадобится 5 баллонов в час по 40 литров (при давлении 150 бар в баллоне будет 6 м<sup>3</sup> водорода), в сутки необходимо 120 баллонов. Строительство водородного трубопровода в суровых климатических условиях Мурманской области нецелесообразно.

Интересное решение — это размещение электролизера для производства водорода в непосредственной близости от потребителя водорода. В этом случае электроэнергия подается с сети, а оборудование размещается рядом с потребителем. Особенностью данной схемы является то, что производство водорода является одновременно и основным и резервным топливом. С учетом наличия генераторов водорода на всех крупных ТЭС данное решение можно считать отработанным. Но для реализации данного решения необходимо произвести модернизацию электрохозяйства, так как при использовании мощных электролизеров необходимо строительство ЛЭП и установка понижающих трансформаторов, поэтому такую схему необходимо реализовывать только при новом строительстве станции.

Основные производители и типы котельных агрегатов, установленных на ТЭЦ и котельных в г. Мурманске:

-ООО «Белгородский котельный завод» (ТП-30Р, ТП-35У, БМ-35Р, ГМ-50, ГМ-50-14/250)

-Машиностроительный завод «Татра» (ПТВМ-50)

-ОАО «Дорогобужский котельный завод» (ПТВМ-100, КВГМ-100)

-ОАО «Бийский котельный завод» (ДКВр-20-13/250)

-ООО «РЭМЕКС» (Турботерм)

С точки зрения представительности по количеству водогрейных котельных агрегатов и установленной мощности, лидером среди производителей является ОАО «Дорогобужский котельный завод» с моделями ПТВМ-100 и КВГМ-100. Поэтому в качестве приоритетных пилотных котельных агрегатов для внедрения водородных технологий рекомендуется рассматривать ПТВМ-100 и КВГМ-100. Основной задачей в этом случае станет модернизация существующих горелок для обеспечения возможности сжигания водорода. Котел КВГМ-100 оборудован тремя газомазутными горелками типа РГМГ – 30, теплопроизводительностью 33,4 Гкал/час каждая, производительность горелки по мазуту марки М-100 – 3540 кг/ч, по природному газу – 3925 м<sup>3</sup>/ч. Диапазон рабочего регулирования горелки 20-100 % от номинальной тепловой мощности. Основные компоненты горелки включают ротационную форсунку с коробом и патрубком первичного воздуха, газовую часть, устройство для направления вторичного воздуха и кольцо-раму (рис.4).

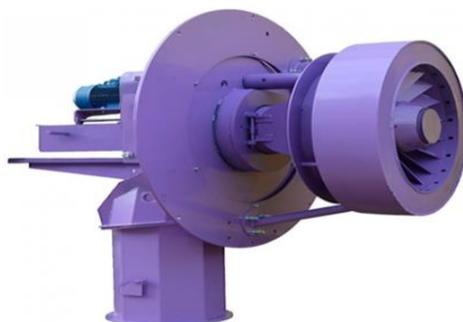


Рис. 4 - Горелка типа РГМГ -30

Fig. 4 - RGMG -30 type burner

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Топливо подается через гибкий шланг по стационарной консольной трубе, расположенной внутри полого вала форсунки. Затем оно попадает в кольцевую полость питателя и далее по топливным каналам вытекает на внутреннюю поверхность распыливающего стакана. Первичный воздух, который участвует в распылении топлива и формировании факела, поступает от автономного вентилятора первичного воздуха. Он проходит через патрубок с шиббером в короб первичного воздуха, а затем через специальные окна в кожухе форсунки направляется к осевому завихрителю первичного воздуха, который имеет профильные лопатки, установленные под углом 30° к оси горелки. Часть первичного воздуха также проходит через воздушные каналы питателя внутрь стакана. Привод вала форсунки осуществляется от электродвигателя с помощью клиноременной передачи. Котел ПТВМ-100 оснащен 16 комбинированными газомазутными горелками, расположенными в два яруса по 8 на фронтальной и задней стенах.

Горелки типа МГМГ-8 (рис.5) обычно используются на котлах, где регулирование тепловой мощности происходит за счет изменения количества работающих горелок. Конструкция горелки МГМГ-8 предполагает периферийный подвод газа, а закрутка воздуха осуществляется с помощью осевых регистров. Производительность горелки по мазуту марки М-100 составляет 790 кг/ч, по природному газу — 980 м<sup>3</sup>/ч, а максимальный расход воздуха — 10440 м<sup>3</sup>/ч.



Рис. 5 - Горелка типа МГМГ-8

Fig. 5 - MGMG-8 type burner

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Газомазутная горелка с механической форсункой состоит из ряда ключевых компонентов: механической мазутной форсунки, рамы горелки, оснащенной кольцевым газовым коллектором и газовым патрубком, поворотного воздушного короба с присоединительными фланцами, а также регистра-завихрителя воздуха. В процессе работы на мазуте топливо поступает в штуцер механической форсунки, проходит через трубку форсунки, распыляется в завихрителе под давлением и затем смешивается с вихревым потоком воздуха. Воздух поступает в корпус горелки через воздухопровод, получает вращательное движение в регистре (завихрителе), смешивается с топливом и далее направляется в топочную камеру котлоагрегата.

В качестве пилотной горелки для отработки технологии перехода на водородное топливо предлагается рассматривать МГМГ-8 в силу относительно малой тепловой мощности (6,9 Гкал/ч) и простоты конструкции (отсутствие ротационной форсунки как в горелках типа РГМГ-30). На данный момент ни одна российская компания не освоила серийное производство водородных котлов или водородных горелок. Разработкой отдельных компонентов и лабораторных стендов занимаются несколько научных организаций, включая АНО «Водородные технологические решения», МФТИ, МАИ и ОАО «НПО «ЦКТИ». В частности, АНО «Водородные Технологические Решения» создала стенд для изучения процессов горения водородсодержащих газов (с соотношением метана и водорода 78% и 22% соответственно) в конденсационном котле. В МФТИ разрабатывается водогрейный котел с тепловой мощностью 100 кВт, при расходе водорода 0,005 кг/с и воздуха 0,1 кг/с, с расчетной температурой в камере сгорания 1400 °С.

Таким образом, при разработке стратегии развития региона, целесообразно сосредоточиться на внедрение технологий низкоуглеродной энергетики, основываясь в первую очередь на доступности энергетических ресурсов, что будет способствовать устойчивому развитию региона. Замена дизельного топлива и мазута на электрическую энергию в энергетическом секторе может ежегодно приносить ежегодно экономию в 8 миллиардов рублей в год, благодаря «зеленым» сертификатам. Эти средства могут быть направлены на модернизацию инфраструктуры региона, включая реконструкцию теплосетей.

Водородные проекты должны стать катализатором технологического прогресса, как это уже происходит в Сахалинской области. Подобные инициативы могут привлечь как федеральное, так и корпоративное финансирование. Поэтому важно развивать компетенции в области производства водорода и его применения в теплоснабжении.

В качестве приоритетных котельных агрегатов для внедрения водородных технологий рекомендуется рассматривать ПТВМ-100 и КВГМ-100 (ОАО «Дорогобужский котельный завод»). Вопрос снижения экологической нагрузки требует системного анализа. В частности, с учетом возможности использования электроэнергии Кольской ВЭС, целесообразно изучить опыт Минской ТЭЦ-2, где в 2021 году были установлены два водогрейных электрокотла мощностью 17 Гкал/ч каждый. Это решение было принято из-за наличия относительно дешевой электроэнергии в энергосистеме, что стало актуальным на фоне необходимости загрузки Белорусской АЭС, введенной в эксплуатацию в 2020 году.

В России существует несколько компаний, производящих высоковольтные электрокотлы большой мощности, таких как ХК «Сибпромэнерго» и ЗАО «Завод Сибирского Технологического Машиностроения». В качестве возможного сценария можно рассмотреть реконструкцию одной из котельных в Мурманске с введением в эксплуатацию водородных котлов и высоковольтных электрокотлов мощностью от 5 до 15 Гкал/ч.

В таблице 2 представлено сравнение углеродного следа различных видов топлива. Из данных видно, что «зеленый» водород обладает значительным углеродным преимуществом по сравнению с другими источниками энергии.

Таблица 2  
Table 2

Углеродный след  
The carbon footprint

Тип топлива	Углеродный след	
	кгСО <sub>2</sub> /кг топлива	кг (МВт*ч)/Гкал
Природный газ	2,59	120,5
Водород	0	34,8
Мазут	3,22	102
Дизельное топливо	3,06	98

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экономическая эффективность использования электроэнергии от возобновляемых источников энергии в Мурманской области вместо дизельного топлива и мазута М-100 определяется двумя основными факторами: конечной стоимостью тепловой энергии и экологическим эффектом, связанным со снижением углеродного следа, уменьшением транспортных расходов и расходов на топливоподготовку, а также уменьшением вредных выбросов, образующихся при сжигании топлива.

#### **Заключение (Conclusions)**

Декарбонизация, повышение энергоэффективности, экологической безопасности, устойчивого развития энергетической отрасли являются одними из преимуществ применения водородного топлива. Водород может использоваться в различных секторах экономики, таких как производство тепловой и электрической энергии, металлургии, нефтехимии, а также в химической и пищевой промышленности. В данном исследовании рассматривается производство водорода с использованием электроэнергии, полученной от ветровых электростанций (ВЭС) в Мурманской области.

Проведенное моделирование работы ветровых электростанций, а также анализ характеристик распределения ветра и распределения Вейбулла позволили прогнозировать генерируемые мощности. Мурманская область характеризуется сложным климатом, поэтому произведенный водород может стать альтернативой традиционным импортируемым топливам. Замена устаревшего генерирующего оборудования является дорогостоящей задачей для региона, поэтому предлагается схема использования водородного топлива на действующих котельных, в качестве добавления к основному.

#### **Литература**

1. Новак А.В. Баланс углеводородных и возобновляемых источников энергии - климатическая и энергетическая безопасность планеты // Энергетическая политика. – 2021. – № 6(160). – С. 4-11.
2. Илюшин П.В., Кучеров Ю.Н. Подходы к оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 2-7.
3. Полетаев И. Р. Энергоэффективность и развитие экономики в современных условиях // Энергетическая политика. – 2024. – № 2(193). – С. 84-89. – DOI 10.46920/2409-5516\_2024\_2193\_84.
4. MohadesehShabani, SohrabKordrostami, MonirehJahaniSayyadNoveir, Renewable energy performance analysis using fuzzy dynamic directional distance function model under natural and managerial disposability, Applied Energy, Volume 352, 2023, 121940.
5. Перминов, Э. М. Перспективы развития возобновляемых источников энергии в XXI веке // Энергетик. – 2016. – № 4. – С. 41-44.
6. Башков Д. Ю. Вызовы и проблемы развития энергетики в отдельных регионах и мире в целом // Экономика строительства. – 2024. – № 7. – С. 30-33.
7. Кузнецов Н. М., Лазарев Н.М. Экологические и экономические аспекты использования электроэнергии для теплоснабжения в Мурманской области // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 6. – С. 45-50.
8. Минин, В. А., Лазарева М. А. Кольская энергосистема: этапы становления, современное состояние и перспективы развития // Электрические станции. – 2023. – № 11(1108). – С. 22-28. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.003.
9. Зверева Э. Р., Дударовская О. Г., Дмитриев А. В. Повышение эффективности смешения мазута с твердой присадкой статическими проточными смесителями // Промышленная энергетика. – 2021. – № 9. – С. 47-51.
10. Филимонов А. Г., Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 3-13.
11. Зверева Э. Р., Марьин Г. Е., Ахметова И. Г., Зверев Л. О. Перспективы получения зеленого водорода на мини-ГЭС для транспорта // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 9(426). – С. 96-110.
12. Кулагин В. А., Грушевенко Д. А. Сможет ли водород стать топливом будущего? // Теплоэнергетика. – 2020. – № 4. – С. 3-17.
13. Кретов Д. А., Рузанов Р.В., Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2-1(35). – С. 20.
14. Kuntsevich, P. The method of reliable estimation and forecasting of capacity of alternative energy generating equipment / P. Kuntsevich // Research in Agricultural Electric Engineering. – 2015. – No. 2. – P. 63-66.

15. Yutong Wu, Guoqing Xu, Junbo Zhou, Dapeng Cao, Research progress of the porous membranes in alkaline water electrolysis for green hydrogen production, *Chemical Engineering Journal*, Volume 505, 2025, 159291.

16. Joungho Park, Sungho Kang, Sunwoo Kim, Hana Kim, Hyun-Seok Cho, Jay H. Lee, Comparative techno-economic evaluation of alkaline and proton exchange membrane electrolysis for hydrogen production amidst renewable energy source volatility, *Energy Conversion and Management*, Volume 325, 2025, 119423

17. Марьин Г. Е., Осипов Б. М., Ахметшин А. Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 84-92.

#### **Авторы публикации**

**Зверева Эльвира Рафиковна** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Марьин Георгий Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Ахметова Ирина Гареевна** - д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

**Щаулов Владимир Валерьевич** – генеральный директор НПО Б энд Индастриз, генеральный директор Национальные Энергетические Технологии, г. Москва, Россия.

**Юсупов Кимал Наилевич** – директор по развитию НПО Б энд Индастриз, директор по развитию Национальные Энергетические Технологии, г. Москва, Россия.

#### **References**

1. Novak A.V. Balance of Hydrocarbon and Renewable Energy Sources - Climate and Energy Security of the Planet // *Energy Policy*. – 2021. – No. 6(160). – P. 4-11.

2. Ilyushin P.V., Kucherov Yu.N. Approaches to Assessing the Possibility of Reliable Power Supply for Consumers through the Construction of Distributed Generation Facilities // *Electro. Electrical Engineering, Power Engineering, Electrical Engineering Industry*. 2014. No. 5. P. 2-7.

3. Poletayev I.R. Energy Efficiency and Economic Development in Modern Conditions // *Energy Policy*. – 2024. – No. 2(193). – P. 84-89. – DOI 10.46920/2409-5516\_2024\_2193\_84.

4. Mohadeseh Shabani, Sohrab Kordrostami, Monireh Jahani Sayyad Noveiri, Renewable Energy Performance Analysis Using Fuzzy Dynamic Directional Distance Function Model under Natural and Managerial Disposability, *Applied Energy*, Volume 352, 2023, 121940.

5. Perminov E.M. Prospects for the Development of Renewable Energy Sources in the 21st Century // *Energetik*. – 2016. – No. 4. – P. 41-44.

6. Bashkov D.Yu. Challenges and Problems of Energy Development in Individual Regions and the World as a Whole // *Construction Economics*. – 2024. – No. 7. – P. 30-33.

7. Kuznetsov N.M., Lazarev N.M. Environmental and Economic Aspects of Using Electricity for Heating in the Murmansk Region // *Energy Security and Energy Saving*. – 2023. – No. 6. – P. 45-50.

8. Minin V.A., Lazareva M.A. Kola Energy System: Stages of Formation, Current State and Development Prospects // *Electric Stations*. – 2023. – No. 11(1108). – P. 22-28. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.003.

9. Zvereva E.R., Dudorovskaya O.G., Dmitriev A.V. Increasing the Efficiency of Mixing Fuel Oil with a Solid Additive Using Static Flow Mixers // *Industrial Energy*. – 2021. – No. 9. – P. 47-51.

11. Filimonov A.G., Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D. Global Energy Integration: New Opportunities for Hydrogen Technologies // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems*. – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 3-13.

12. Zvereva E.R., Mar'yan G.E., Akhmetova I.G., Zverev L.O. Prospects for the Production of Green Hydrogen at Mini-HPPs for Transport // *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*. – 2024. – No. 9(426). – P. 96-110.

13. Kulagin V.A., Grushevchenko D.A. Can Hydrogen Become the Fuel of the Future? // *Thermal Energy*. – 2020. – No. 4. – P. 3-17.

14. Kretov D.A., Ruzanov R.V. Forecasting Electricity Consumption of an Energy Supply Company Using Artificial Neural Networks // Engineering Herald of Don. – 2015. – No. 2-1(35). – P. 20.

Kuntsevich P. The Method of Reliable Estimation and Forecasting of Capacity of Alternative Energy Generating Equipment / P. Kuntsevich // Research in Agricultural Electric Engineering. – 2015. – No. 2. – P. 63-66.

15. Yutong Wu, Guoqing Xu, Junbo Zhou, Dapeng Cao, Research Progress of the Porous Membranes in Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production, Chemical Engineering Journal, Volume 505, 2025, 159291.

16. Joungho Park, Sungho Kang, Sunwoo Kim, Hana Kim, Hyun-Seok Cho, Jay H. Lee, Comparative Techno-Economic Evaluation of Alkaline and Proton Exchange Membrane Electrolysis for Hydrogen Production Amidst Renewable Energy Source Volatility, Energy Conversion and Management, Volume 325, 2025, 119423.

17. Marin G.E., Osipov B.M., Akhmetshin A.R. Investigation of the Use of Hydrogen as Fuel to Improve the Energy and Environmental Performance of Gas Turbine Installations // Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Problems. – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 84-92.

#### **Authors of the publication**

**Elvira R. Zvereva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**George E. Marin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Irina G. Akhmetova** - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Vladimir V. Shchaulov**– General Director of NPO B and Industries, general Director of National Energy Technologies, Moscow, Russia.

**Kimal N. Yusupov** – Development – Director of NPO B and Industries, development Director of National Energy Technologies, Moscow, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **16.03.2025 г.**

**Отредактировано** **27.03.2025 г.**

**Принято** **13.05.2025 г.**

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-198-205

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Тахавиев Т.М., Дмитриев А.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)

[timur.tahaviev@mail.ru](mailto:timur.tahaviev@mail.ru)

**Резюме:** Применение топливных элементов на природном газе может значительно увеличить устойчивость и эффективность энергоснабжения частных домов, обеспечить важные экологические преимущества и снизить затраты на энергоресурсы. Однако широкое использование топливных элементов на природном газе в жилых домах ограничено рядом факторов, среди которых наиболее значимым является высокая стоимость топливного элемента. В исследовании проведен анализ потребления энергоресурсов для двух систем энергообеспечения, стандартной системы на основе двухконтурного газового котла и системы с применением твердооксидного топливного элемента на природном газе. **ЦЕЛЬ.** Определить экономическую целесообразность применения твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) на природном газе в частных жилых домах. **МЕТОДЫ.** Сбор данных о потреблении энергоресурсов анализируемого здания проводился с помощью показаний счетчиков. На основании этих данных создавались годовые графики потребления электроэнергии и природного газа. Схема системы энергообеспечения частного дома с использованием ТОТЭ, а также уравнение математической модели потребления природного газа системой с ТОТЭ строились на основе законов сохранения энергии и массы, а также с применением статистических методов анализа существующих исследований в области применения топливных элементов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе проведения исследования был составлен график динамики цен на энергоресурсы по месяцам для двух сравниваемых систем. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Внедрение систем энергоснабжения на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на природном газе, в жилых домах может быть многообещающим решением. Сравнение системы на основе двухконтурного газового котла без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе показало, что ежемесячная экономия колеблется от 24 % до 47 %, при среднем годовом значении в 34,5 %. Для семьи из трех человек, проживающей в двухэтажном кирпичном доме в Казани, Республика Татарстан, это означает ежегодную экономию в размере 25 080 рублей.

**Ключевые слова:** твердооксидный топливный элемент; экономическая эффективность; энергоэффективность; рекуперация тепла; когенерационная система.

**Для цитирования:** Тахавиев Т.М., Дмитриев А.В. Экономическая эффективность систем с применением твердооксидных топливных элементов на природном газе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 198 -205. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-198-205.

## ECONOMIC EFFICIENCY OF SYSTEMS USING SOLID OXIDE FUEL CELLS POWERED BY NATURAL GAS

Takhaviev T.M., Dmitriev A.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

[timur.tahaviev@mail.ru](mailto:timur.tahaviev@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)

**Abstract:** The use of natural gas fuel cells can significantly increase the sustainability and efficiency of energy supply to private homes, provide important environmental benefits and reduce energy costs. However, the widespread use of natural gas fuel cells in residential buildings is limited by a number of factors, among which the most significant is the high cost of a fuel cell. The study analyzes energy consumption for two energy supply systems, a standard system based on a double-circuit gas boiler and a system using a solid oxide fuel cell powered by natural gas. purpose. To determine the economic feasibility of using solid oxide fuel cells (TTE) on natural gas in private residential buildings. METHODS. Data on energy consumption of the analyzed building was collected using meter readings. Based on these data, annual schedules of electricity and natural gas consumption were created. The scheme of the energy supply system of a private house using TTE, as well as the equation of the mathematical model of natural gas consumption by the system with TTE, were based on the laws of conservation of energy and mass, as well as using statistical methods for analyzing existing research in the field of fuel cell applications. results. During the study, a graph of the dynamics of energy prices by month was compiled for the two compared systems. conclusion. The introduction of energy supply systems based on solid oxide fuel cells (TTE) powered by natural gas in residential buildings may be a promising solution. A comparison of a system based on a double-circuit gas boiler without a TTE and a system with a TTE on natural gas showed that monthly savings range from 24% to 47%, with an average annual value of 34.5%. For a family of three living in a two-storey brick house in Kazan, Republic of Tatarstan, this means an annual savings of 25,080 rubles.

**Keywords:** solid oxide fuel cell; economic efficiency; energy efficiency; heat recovery; cogeneration system.

**For citation:** Takhaviev T.M., Dmitriev A.V. Economic efficiency of systems using solid oxide fuel cells powered by natural gas. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 198-205. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-198-205.

### **Введение (Introduction)**

Использование когенерационных систем для снижения потребления электроэнергии и тепла в жилых домах может стать актуальным и востребованным решением [1]. Среди различных инновационных путей, доступных для использования в строительстве, в том, что касается производства тепловой энергии и электроэнергии, топливные элементы считаются наиболее перспективным направлением.

Применение твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) на природном газе предполагает использование тепловой энергии, образующейся при сжигании метана, для нужд отопления, подогрева воды и выработки электроэнергии.

Использование ТОТЭ на природном газе в жилом доме может быть актуально по нескольким причинам, связанным с энергоэффективностью, экологическими преимуществами, удобством эксплуатации и экономией ресурсов.

Топливные элементы, особенно в системе когенерации (совместное производство тепла и электричества), могут значительно повысить эффективность использования энергии по сравнению с традиционными методами генерации. В отличие от обычных газовых котлов и электростанций, которые теряют большое количество энергии в виде тепла, топливные элементы используют химическую энергию природного газа для производства как электричества, так и тепла, что позволяет достичь общего КПД до 80–85% [2]. Данное решение позволяет сократить затраты на энергию для отопления и электроснабжения.

Процесс сжигания природного газа сопровождается меньшим выделением углекислого газа и других загрязняющих веществ, нежели сжигание угля и нефти. В связи с этим работа топливных элементов несет меньшую антропогенную нагрузку на биоценозы по сравнению с традиционными методами сжигания топлива. В дополнение, использование высокоэффективных топливных элементов позволяет минимизировать выбросы CO<sub>2</sub>, что способствует снижению углеродного следа [3].

ТОТЭ на природном газе позволяют дому стать частично или полностью независимым от внешней сети электроснабжения. Это особенно актуально для удаленных или пригородных районов, где обеспечение бесперебойного энергоснабжения может быть затруднено.

Высокая эффективность работы топливных элементов обеспечивает низкие эксплуатационные расходы, снижает потребность в закупке большого количества топлива, а также сокращает затраты на электроэнергию и отопление. В случае, если система работает в

режиме когенерации, дом может получить возможность продавать излишки электричества в сеть или перенаправлять электроэнергию на других потребителей (питание электромобилей).

В топливных элементах отсутствуют механические детали, которые находятся в движении, что обеспечивает их бесшумную работу и снижает уровень вибрации по сравнению с традиционными системами производства энергии, такими как двигатели внутреннего сгорания. Это важно для комфортного проживания в жилых домах, где шум и вибрации могут доставлять неудобства. Также отсутствие подвижных частей уменьшает износ системы и требует относительно малого обслуживания по сравнению с традиционными системами отопления и генерации электричества.

Топливные элементы могут быть эффективно интегрированы с другими технологиями, например, с солнечными панелями или ветряными установками. В таких системах топливные элементы могут работать как резервный источник энергии, а в солнечные или ветреные дни могут использовать избыточную электроэнергию для зарядки аккумуляторов.

В условиях стремительного развития технологий «умных» домов применение топливных элементов может стать частью комплексной системы энергоснабжения, которая самостоятельно регулирует расход энергии в соответствии с нуждами дома. Это может подразумевать автоматическую регулировку температуры, контроль за потреблением электроэнергии и оптимизацию работы системы отопления.

Основные факторы, препятствующие использованию ТОТЭ на природном газе в жилых домах – высокая стоимость, проблема осаждения аморфного углерода на аноде и его последующая деактивация, проблема значительного падения генерируемой мощности при наличии сероводорода в топливе.

Осаждение аморфного углерода на аноде может быть решено путем применения стойких к углеродной и сероводородной деградации материалов для анода, а падение генерируемой мощности при наличии сероводорода в топливе решается развитием системы очистки топлива от сероводородных включений [4].

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Эффективность системы с использованием топливного элемента напрямую зависит от выбора схемы преобразования тепловой энергии в электрическую. Так отмечается, что самый низкий КПД наблюдается в системах прямой термоэлектрической генерации, где используется прямое сжигание метана для создания высокой температуры 600 – 1000 °С [5] на горячей стороне термоэлектрического элемента, в то время как его холодная сторона охлаждается естественным или принудительным образом. В таких системах КПД не превышает 15% [6]. Более выгодная схема, при которой энергетическая эффективность системы достигает 50% и 56,9% [7], предполагает комбинированное использование тепла и электроэнергии (когенерация). В этой схеме используется как электроэнергия, так и тепло, выделяемое при сжигании метана и работе ТОТЭ. Также действенным решением в увеличении общего КПД системы может стать применение рекуперации. После прохождения через основной термоэлектрический генератор горячие газы направляются в теплообменник или дополнительный термоэлектрический элемент для рекуперации остаточного тепла. При такой схеме электрическая эффективность системы составит 50 – 60 % [8], а общая эффективность системы может достигать 90 % [2]. Когенерационная система на основе ТОТЭ и теплового насоса, работающая на природном газе, достигает высокой энергоэффективности 93,04 %, при этом эффективность выработки электроэнергии 44,48 %, эффективность использования эксергии 39,13 %, эффективность нагрева 48,65% [9]. Система с использованием газотурбинного преобразования перед ТОТЭ позволяет достичь общий КПД в 40 – 70 % [10]. В этой схеме сжигание метана используется для вращения газовой турбины, которая генерирует электричество. Выходные горячие газы из турбины затем направляются на термоэлектрические преобразователи для дополнительной генерации электроэнергии.

При использовании систем с ТОТЭ на природном газе в жилых домах необходимо учитывать неравномерность в потреблении энергоресурсов, нагрузка на систему будет изменяться в течении суток. Для сглаживания колебаний в работе системы и поддержания её эффективности необходимо использовать литий-ионные аккумуляторы, которые будут обеспечивать накопление и регулирование энергии [11]. Такая комбинация улучшает стабильность и гибкость системы. Литий-ионные аккумуляторы обладают рядом достоинств: они отличаются высокой энергетической ёмкостью, обладают длительным сроком службы (3000–5000 циклов), быстро откликаются на команды и имеют компактные габариты.

В качестве объекта для сравнительного анализа выбран двухэтажный кирпичный частный дом с сопротивлением теплопередачи ограждающих конструкций не менее

требуемых значений,  $R_0^{тп}$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, для Республики Татарстан города Казани. Требуемые сопротивления теплопередачи для ограждающих конструкций [12]: наружные стены  $R_0^{тп} = 3,18$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, кровля  $R_0^{тп} = 4,76$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, окна  $R_0^{тп} = 0,68$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, дверь  $R_0^{тп} = 0,84$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, пол по грунту по зонам I –  $R_0^{тп} = 2,1$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, II –  $R_0^{тп} = 3,8$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, III –  $R_0^{тп} = 5,2$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, IV –  $R_0^{тп} = 7,7$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт.

В доме проживает семья, состоящая из трех человек, установлен газовый двухконтурный котел на отопляемую площадь 240  $\text{м}^2$ . На рис. 1 представлен годовой график потребления электроэнергии. Данные приняты на основе показаний счетчика электроснабжения «Энергомера ЕМ112».



Рис. 1. Годовой график потребления электроэнергии Fig. 1. Annual electricity consumption schedule

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

На рисунке 2 представлен годовой график потребления природного газа. Данные приняты на основе показаний счетчика учета природного газа «СГ-1».

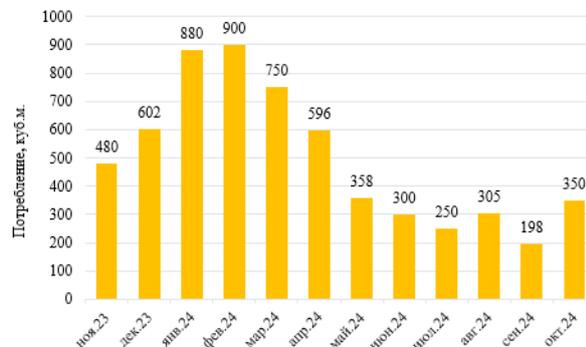


Рис. 2. Годовой график потребления природного газа Fig. 2. Annual schedule of natural gas consumption

\*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

В качестве альтернативной системы энергообеспечения частного дома принята схема с использованием твердого топливного элемента (ТОТЭ) на природном газе и рекуперацией остаточного тепла. Данное решение предполагает применение ТОТЭ на природном газе для выработки электроэнергии. Выделяемое в результате химической реакции тепло утилизируется в рекуператоре, обеспечивая подпитку теплоносителя для нужд отопления и горячего водоснабжения, что позволит снять часть нагрузки с газового котла. Двухконтурный газовый котел необходим для нужд отопления и горячего водоснабжения. Мощность котла рассчитывается с учетом тепловой мощности ТОТЭ. Схема системы энергообеспечения дома с использованием ТОТЭ на природном газе представлена на рисунке 3.

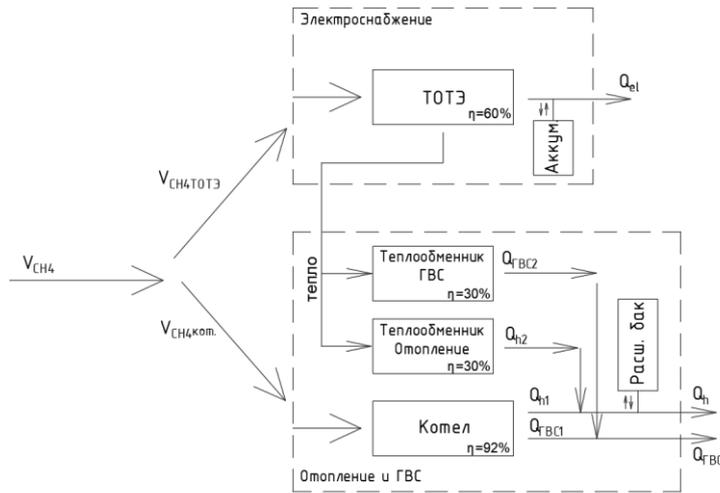


Рис. 3. Схема системы энергообеспечения дома с использованием ТОТЭ на природном газе  
 Fig. 3. Diagram of the energy supply system for a house using a natural gas heating element  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При данной схеме энергообеспечения в здание необходимо завести только природный газ, электричество вырабатывается системой. Поступающий природный газ в объеме  $V_{CH_4}$  разделяется на два потока объемами  $V_{CH_4котл.}$  и  $V_{CH_4ТОТЭ}$ . Поток с объемом  $V_{CH_4котл.}$  обеспечивает питание двухконтурного газового котла. Мощность системы отопления, вырабатываемая газовым котлом  $Q_{h1}$ , мощность системы горячего водоснабжения  $Q_{ТВС1}$ .

Поток с объемом  $V_{CH_4ТОТЭ}$  обеспечивает питание твердооксидного топливного элемента. Природный газ и ограниченное количество кислорода подаются в реактор ТОТЭ, где происходит реакция частичного окисления (1), в результате которой образуются водород и оксид углерода.



Выработанный водород участвует в электрохимической реакции с кислородом (2), генерируя электрическую энергию  $Q_{el}$ , воду и теплоту  $Q_h$ .



Полученная теплота  $Q_h$  утилизируется в процессе рекуперации в теплообменниках систем отопления и ГВС, нагревая теплоноситель в контурах подпитки  $Q_h$  и  $Q_{ТВС1}$ . Контур подпитки обеспечивают качественное регулирование систем отопления и горячего водоснабжения.

При совместной работе газового котла и ТОТЭ с рекуперацией тепла система вырабатывает электроэнергию  $Q_{el}$ , а также тепло на нужды отопления  $Q_h$  и горячее водоснабжение  $Q_{ТВС}$ .

Объем потребляемого природного газа системой можно определить по формуле (3):

$$V_{CH_4} = V_{CH_4ТОТЭ} + V_{CH_4котл.} = \frac{A_{el} \cdot 3,6}{\eta_{el} \cdot Q_{н.з}} + V_{CH_4котл.} \quad (3)$$

где  $V_{CH_4}$  – объем потребляемого природного газа системой, м<sup>3</sup>;  $V_{CH_4ТОТЭ}$  – объем потребляемого природного газа ТОТЭ, м<sup>3</sup>;  $V_{CH_4котл.}$  – объем потребляемого природного газа двухконтурным газовым котлом, м<sup>3</sup>. Данные принимаются согласно годовому графику потребления природного газа рис.2.;  $A_{el}$  – количество электроэнергии, потребляемой системой, кВт·ч. Данные принимаются, согласно годовому графику потребления электроэнергии рис.1;  $\eta_{el}$  – КПД электрический топливного элемента, 60 % [8]. Данный показатель измеряет, насколько эффективно устройство преобразует химическую энергию топлива в электрическую энергию;  $Q_{el}$  – низшая теплота сгорания природного газа,

31,8 МДж/м<sup>3</sup>. Низшая теплота сгорания природного газа при стандартных условиях должна быть не менее 31,8 МДж/м<sup>3</sup> [13].

Годовой график потребления природного газа системой, использующей ТОТЭ и рекуперацию тепла представлен на рисунке 4.

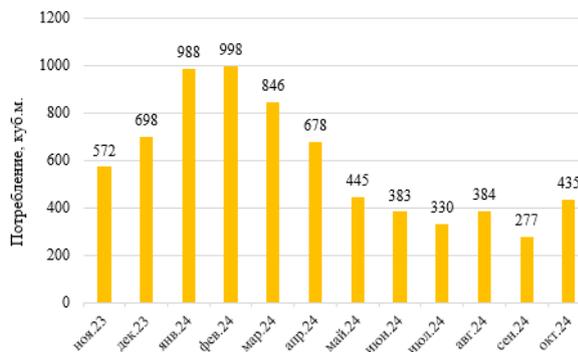


Рис. 4. Годовой график потребления природного газа системой с ТОТЭ *Fig. 4. Annual schedule of natural gas consumption by the CTE system*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

### Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Для расчёта стоимости потребления энергоресурсов используются следующие коэффициенты: для электроэнергии принят расчетный коэффициент в размере 5,85 руб./кВт·ч [14], для природного газа принят расчетный коэффициент в размере 7,47 руб./м<sup>3</sup> [15]. На рисунке 5 представлен график динамики цен на энергоресурсы по месяцам для двух систем: традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе.

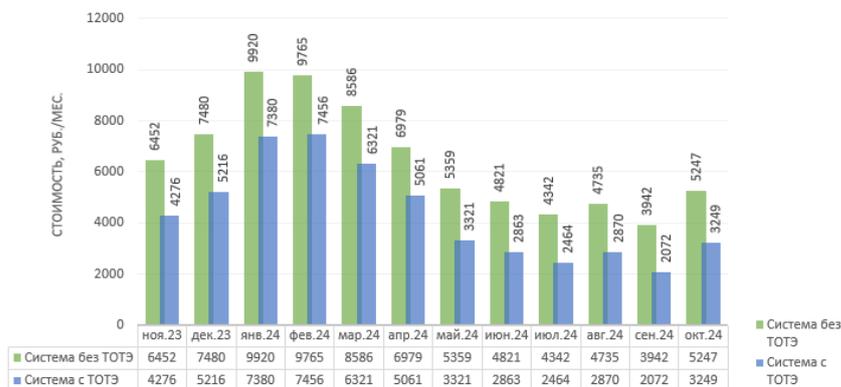


Рис. 5. График динамики цен на энергоресурсы по месяцам для двух систем: традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе *Fig. 5. Graph of the dynamics of energy prices by month for two systems: a traditional system without TOC and a system with TOC on natural gas*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В результате сравнения стоимости энергоресурсов по месяцам для двух систем, традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе, выяснилось, что применение технологии, основанной на использовании твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) на природном газе в сочетании с рекуперацией тепла, является эффективным решением, так как позволяет сократить расходы на оплату энергоресурсов в среднем на 34,5 % ежемесячно. Годовая экономия составляет двадцать пять тысяч восемьдесят рублей.

### Заключение (Conclusion)

Использование в жилых домах систем энергоснабжения на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), работающих на природном газе, может стать перспективным решением. Такие системы обладают рядом преимуществ: снижение расхода энергии, высокая эффективность преобразования энергии, экологичность, энергетическая автономность, экономическая выгода.

Сравнение двух систем, традиционной системы без ТОТЭ и системы с ТОТЭ на природном газе показало, что ежемесячная экономия составляет от 24 % до 47 %, а в среднем за год 34,5 %. Для семьи из трех человек, которая живёт в двухэтажном кирпичном доме в Республике Татарстан, городе Казани, экономия в денежном выражении составит 25080 рублей в год.

Одной из главных причин, по которой системы с ТОТЭ на природном газе не используются, может быть высокая стоимость топливного элемента. На сегодняшний день стоимость ТОТЭ варьируется от 1000\$ до 5000\$ за 1 кВт. Важно отметить, что данная цена будет снижаться с увеличением объема производства и внедрением новых технологий. Прогнозируется, что стоимость снизится на 20 – 50 % в течение следующих 5 – 10 лет. Государственная поддержка может дополнительно снизить стоимость на 10 – 30 % в зависимости от программы. Таким образом цена твердооксидного топливного элемента (ТОТЭ) на природном газе мощностью 400 Вт, подходящего для установки в частные жилые дома, может достигнуть 12 – 20 тыс. рублей. При этом срок окупаемости такого оборудования не превысит одного года.

### Литература

1. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310, №133145.
2. Липилин А.С., Нефедкин С.И., Чухарев В.Ф., Киселев И.В., Козлов С.И., Юдин А.Л. Энергоснабжение малоэтажных домов на основе эффективного использования природного газа в технологии ТОТЭ // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010. № 883.
3. Singla M., Nijhawan P., Oberoi A. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. pp. 15607-15626.
4. Смородова О.В., Китаев С.В., Ерилин И.С. К проблемам использования природного газа в качестве топлива для твердооксидных топливных элементов // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2018. № 4-1. с. 51-54.
5. Choudhary T., Kumar Sahu M., Sanjay. CFD modeling of SOFC cogeneration system for building application // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 109. pp. 361-368.
6. Собянин В.А. Высокотемпературные твердооксидные топливные элементы и конверсия метана // *Российский химический журнал*. 2003. т. XLVII. №6.
7. Ahmadi S., Ghaebi H., Shokri A. A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles // *Energy*. 2019. Vol. 186. № 115899.
8. Heidarshenas B., Abdullah M.M., Sajadi S.M., Yuan Y., Malekshah E.H., Aybar H. Exergy and environmental analysis of SOFC-based system including reformers and heat recovery approaches to establish hydrogen-rich streams with least exergy loss // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. pp. 845-853.
9. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310. № 133145.
10. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Печенкин А.В. Обзор проектных схем гибридных систем с твердооксидным топливным элементом и газовой турбиной для комбинированного производства тепла и электроэнергии // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. 2022, 15(7). С. 812–834.
11. Baldi F., Wang L., Perez-Fortes M., Marechal F. A Cogeneration system based on solid oxide and proton exchange membrane fuel cells with hybrid storage for off-grid applications // *Frontiers in energy research*. 2019. Vol. 6. № 139.
12. СП 50.13330.2024 «СНИП 23-02-2003 Тепловая защита зданий».
13. ГОСТ 5542-2014 «Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия».
14. Постановление Государственного комитета РТ по тарифам от 15.12.2023 №682-24/э-2023.
15. Постановление Государственного комитета РТ по тарифам от 19.12.2023 № 818-1/г-2023.

### Авторы публикации

*Дмитриев Андрей Владимирович* – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский государственный энергетический университет.

*Тахавиев Тимур Маратович* – аспирант Казанского государственного энергетического университета.

## References

1. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310, №133145. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133145.
2. Lipilin A.S., Nefedkin S.I., Chukharev V.F., Kiselev I.V., Kozlov S.I., Yudin A.L. Energy supply of low-rise housing based on the efficient use of natural gas in the TTE technology // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010. № 883.
3. Singla M., Nijhawan P., Oberoi A. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. pp. 15607-15626. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>.
4. Smorodova O.V., Kitaev S.V., Erilin I.S. On the possibilities of using primary gas as fuel for solid oxide components // *Norwegian Journal for the Development of International Science*. 2018. № 4-1. с. 51-54.
5. Choudhary T., Kumar Sahu M., Sanjay. CFD modeling of SOFC cogeneration system for building application // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 109. pp. 361-368. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.087.
6. Sobyenin V.A. High-temperature solid oxide fuel cells and methane conversion // *Russian Chemical Journal*. 2003. vol. XLVII. No. 6.
7. Ahmadi S., Ghaebi H., Shokri A. A comprehensive thermodynamic analysis of a novel CHP system based on SOFC and APC cycles // *Energy*. 2019. Vol. 186. № 115899. DOI: 10.1016/j.energy.2019.115899.
8. Heidarshenas B., Abdullah M.M., Sajadi S.M., Yuan Y., Malekshah E.H., Aybar H. Exergy and environmental analysis of SOFC-based system including reformers and heat recovery approaches to establish hydrogen-rich streams with least exergy loss // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. pp. 845-853. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.243.
9. Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskilly A.P. Technoeconomic and environmental performance assessment of solid oxide fuel cell-based cogeneration system configurations // *Energy*. 2024. Vol. 310. № 133145. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133145.
10. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Pechenkin A.V. Review of design schemes of hybrid systems with a solid oxide fuel cell and a gas turbine for combined heat and power generation // *Journal of Siberian Federal University. un-ta. Machinery and technology*. 2022, 15(7). pp. 812-834.
11. Baldi F., Wang L., Perez-Fortes M., Marechal F. A Cogeneration system based on solid oxide and proton exchange membrane fuel cells with hybrid storage for off-grid applications // *Frontiers in energy research*. 2019. Vol. 6. № 139. <https://doi.org/10.3389/ferng.2018.00139>.
12. SP 50.13330.2024 "SNIP 23-02-2003 Thermal protection of buildings".
13. GOST 5542-2014 "Natural combustible gases for industrial and municipal purposes. Technical specifications".
14. Resolution of the State Committee of the Republic of Tatarstan on Tariffs dated 12/15/2023 No. 682-24/E-2023.
15. Resolution of the State Committee of the Republic of Tatarstan on Tariffs dated 12/19/2023 No. 818-1/g-2023.

## Authors of the publication

*Andrey V. Dmitriev* – Kazan State Power Engineering University.

*Timur M. Takhaviev* – Kazan State Power Engineering University.

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

*Получено* *06.02.2025 г.*

*Отредактировано* *21.02.2025 г.*

*Принято* *27.03.2025 г.*



## ТЕПЛООБМЕН В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПРИРОДНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю.

Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даукеева

г. Алматы, Республика Казахстан

ORCID\*: 0000-0001-8778-7851, d.bondartsev@aues.kz

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Исследование процессов теплообмена в капиллярно-пористых природных покрытиях, создаваемых термическим напылением порошков при их нанесении термоинструментом. В качестве природных материалов выбраны горные породы кварциты, граниты, тешениты, туф и мрамор. Создан термоинструмент со спиновой детонационной струей и разработана технология получения порошков новым способом. *МЕТОДЫ.* Термоинструмент за счет автоматического устройства позволяет управлять режимом создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела. Разработана вытеснительная схема питания инструментом и методика проведения экспериментом. Порошки готовились в специальных формах из системы сопряженных эллиптических поверхностей и различным эксцентриситетом. Технология увеличивает выход порошка класса  $(0\div 2)\times 10^{-3}$  м и повышает степень упрочнения порошка. Горючее дожигалось на покрытии с коэффициентом избытка окислителя  $0.6\div 0.8$ , до шести раз возрастали удельные нагрузки и составляли  $(2\div 15)\times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Вязкие породы подвергались оплавлению. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Поперечная скорость участка воспламенения спиновой детонационного факела близка к скорости детонации и вдвое превышала скорость звука в струе. Предельная область тепловых нагрузок для покрытий при поддержании перегрева  $(20\div 75)$  К превосходила кипение в тонких пленках, в большом объеме и тепловых трубах. Исследования с помощью голографической интерферометрии показало, что точкой отсчета является остаточная деформация, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц, а детонационное напыление снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц. Природный материал обеспечивает высокую эрозионную стойкость покрытия. Совместные методики исследования с помощью голографии, скоростной киносъемки и аналитического решения позволяют уточнять механизм создания покрытия и получать расчетные значения тепловых потоков и напряжений.

**Ключевые слова:** природные материалы; покрытия; камера сгорания; термоинструмент; голография, напыление.

**Для цитирования:** Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Теплообмен в капиллярно-пористых природных покрытиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 206 -217. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-206-217.

## HEAT TRANSFER IN CAPILLARY-POROUS NATURAL COATINGS

Genbach A.A., Bondartsev D.Yu.

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev

Almaty, Republic of Kazakhstan

d.bondartsev@aues.kz

**Abstract:** *RELEVANCE.* Study of heat exchange processes in capillary-porous natural coatings created by thermal spraying of powders during their application with a thermal tool. Quartzite, granite, teshenite, tuff and marble rocks are chosen as natural materials. A thermal tool with spin detonation jet was created and the technology of powder production by a new method was developed. *METHODS.* The thermo-tool due to the automatic device allows controlling the mode of coating creation by changing the burner power and torch length. The

displacement scheme of tool feeding and the methodology of experimentation were developed. Powders were prepared in special molds from the system of conjugate elliptical surfaces and different eccentricity. The technology increases the powder yield of  $(0\div 2)\times 10^{-3}$  m class and increases the degree of powder hardening. The combustor was afterburning on the coating with oxidizer excess coefficient  $0.6 \div 0.8$ , specific loads increased up to six times and amounted to  $(2\div 15)\times 10^6$  W/m<sup>2</sup>. The ductile rocks were subjected to melting. RESULTS. The transverse velocity of the ignition section of the spin detonation plume was close to the detonation velocity and twice the speed of sound in the jet. The thermal stress limit region for the coatings while maintaining superheat of  $(20\div 75)$  K was superior to boiling in thin films, large volume, and heat pipes. Studies by holographic interferometry showed that the point of reference is the residual deformation defined by a network of small cracks that do not disappear when the thermal load is removed. CONCLUSION. A nonlinear particle displacement curve was found, and detonation spraying reduces powder particle fracture along the interfaces of unmelted particles. The natural material provides high erosion resistance of the coating. The joint methods of investigation by means of holography, high-speed filming and analytical solution allow to specify the mechanism of coating creation and to obtain calculated values of heat fluxes and stresses.

**Keywords:** natural materials; coatings; combustion chamber; thermo-intrusion; holography; sputtering.

**For citation:** Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Heat transfer in capillary-porous natural coatings. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3): 206-217. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-206-217.

#### **Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)**

Весьма актуально проводить научные исследования теплообмена в капиллярно-пористых природных материалах КПП [1]. В качестве таких материалов выбираются горные породы: кварциты, граниты и тешениты. Из них изготавливаются порошки и наносятся напылением на обложку. На основе физической модели в реальной КПС записываются уравнения теплопроводности термоупругой задачи. Решение проводится для предельных величин тепловых потоков плавления  $q_{пл.}$ , сжатия  $q_{сж.}$  и растяжения  $q_{раст.}$ , вызывающих соответствующие термические напряжения  $\sigma$ . Модель проверяется экспериментом с использованием скоростной киносъёмки образующихся частиц (шелушке) СКС-1М.

Однако требуется создать термоинструмент с детонационной струей, провести технологию получения порошков, раскрыть механизм протекающих процессов теплообмена и разрушения покрытий.

Построена научная методика исследования с проведением интегрального эксперимента для испытания девяти камер сгорания термоинструмента [2], который предназначен для обработки естественных минеральных сред. Для понимания природы разрушения использована скоростная киносъёмка.

Однако требуется создать технологию нанесения напылением порошков природных материалов (факелы, дробление материалов) и изучить механизм разрушения.

Наряду с изучением природных КПП на предмет их предельного состояния  $q_{пред.}$ ,  $\sigma_{пред.}$  [1,2] производятся исследования кризиса теплообмена кипением в КПС металлургических сеток [3,4]. Строится физическая модель кипящего потока с учетом совместного действия капиллярных  $\Delta P_{кап.}$  и массовых  $\Delta P_{кап+г}$  сил с избытком  $m_{ж}/m_{п.}$ . Механизм процесса теплообмена познается с помощью голографической интерферометрии и скоростной киносъёмки. Определяются критические удельные тепловые потоки  $q_{кр.}$  для разных давлений  $P$  через интегральные и термогидравлические характеристики.

Однако не исследован совместный теплообмен в КПП, покрытых КПС.

Проводится разработка метода диагностики переходных режимов кипения на основе флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности  $T_{ст.}$  с помощи дискретного вейвлет – преобразования взамен традиционному преобразованию Фурье для получения амплитудно-частотных характеристик флуктуаций температуры и диагностирования смены режима теплообмена [5].

Для настоящего исследования представляет интерес взаимосвязь предельного

состояния КПП и кризиса теплообмена в КПС при смене режима теплообмена, что позволит в режиме реального времени создавать систему диагностики покрытий и структур ( $\phi'$ ,  $\phi'_{кр}$ ).

Актуальным является изучения прогресса в механизмах реализации охлаждения поверхностей распылением (струйным способом) [6]. Рассмотрены способы улучшения характеристик путем чередования видов применяемой жидкости, изменением схемы потока, параметров воздуха и воды, расстояния между соплом и поверхностью, применение струйно-инжекционного метода.

Однако требуется исследовать воздействие струйного охлаждения на теплообмен в КПП и КПС, особенно его влияние на природные материалы.

В энергетических технологиях перспективны двумерные наноматериалы [7] как интенсификаторы теплообмена (2-Д материалы). Они могут создаваться в виде пленок, композитов, наножидкостей, материалов на основе графена. Интересны теплопередающие способности при процессах испарения, кипения и конденсации, особенно для тепловых труб.

Однако авторы [7] указывают на определенные трудности при выборе двумерных материалов, требуется дополнительные исследования для их активного применения нами исследуемых КПП и КПС.

В работе [8] численно исследовано турбулентное пламя сгорания газа и воздуха. Горелка частично заполнена пористым материалом. Пламя становится короче и более широким при определенном значении пористости. При большей толщине пористого слоя  $\delta$  температура распределяется в большем объеме при меньшей длине пламени.

Однако в [8] не ясно размещение и вид пористого материала, в работе нет эксперимента.

В работе [9] разработана пористая решетчатая структура, работающая при соударении струи. Высота  $h$  структуры  $(4\div 12)\times 10^{-3}$  м, пористость  $\varepsilon$   $(0.52\div 0.92)$  и скорость струи  $V$   $(1\div 4)$  м/с. Теплообмен возрастал с уменьшением пористости, и имел оптимум при высоте решетки  $6\times 10^{-3}$  м. Теплообмен на 35% больше, чем у ребристой структуры, и улучшался за счет интеграции структуры и воздействия струи.

Исследование [9] трудно применить для процесса нанесения напылением покрытия.

Проведены испытания [10] на влияние высоких температур на сжатие образцов гранита с тремя отверстиями, от 450 °С до 900 °С. Изменился цвет, объем гранита увеличился, масса уменьшилась, плотность  $\rho$  снизилась. Прочность сначала увеличивалась, а потом снижалась, модуль упругости уменьшался. Пик деформации резко возрастал после 450 °С. С использованием метода акустической эмиссии и фотомониторинга исследовано зарождение, распространение и слияние трещин в образцах гранита. Процесс растрескивания показал, что распределение трещин от поверхности отверстий приводит к слиянию между соседними отверстиями. Режимы разрушения разделены на три категории: режим расщепления, режим сдвига, смешанный режим и они связаны с температурой термообработки.

Данное исследование [10] представляет интерес для случая применения напыления порошков горных пород для создания покрытий, а также для применения голографии, СКС-1М и термоупругости для понятия механизма слияния трещин. Исследовались характеристики пористой структуры гранитов при различных режимах охлаждения на основе технологии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [11]. При 150 °С водяное охлаждение уменьшает количество пор породы, происходит термическое упрочнение. При 300 °С диаметр микропор  $d$  увеличивается при 450 °С поры мезопор разрастаются. При 600 °С, когда превышена кварцевая температура 573 °С фазового перехода, количество и диаметр пор породы резко увеличивается. Термоаккумулирующие свойства макропористых и мезопористых пор проявляются при оптимальных температурах  $T$  (450 °С и 600 °С). Исследования проводились в диапазоне (25-1050) °С. С повышением температуры (573 °С и 800 °С) происходит увеличение объема кварца и концентрации напряжений, образуя явление термического растрескивания.

Однако необходимо провести исследования напыления порошка гранита с целью образования природного покрытия термоинструментом и эксплуатации покрытия для различных удельных тепловых нагрузках  $q$ , включая предельные  $q_{пред}$ , и степени перегрева покрытия  $\Delta T$ ,  $\Delta T_{кр}$ .

Напыление порошков производится в основном [12-15] на установках с электрической дугой и взрывными веществами, с применением плазмотронов с

электродуговой металлизацией и с помощью газопламенных горелок, работающих с малыми скоростями истечения применительно в подавляющем большинстве случаев к металлам и их сплавам.

Существующие сверхзвуковые горелки являются плазмотронами с электрической дугой весьма большой мощности  $N_3$  ( $> 40\div 50$  кВт) и работающие при высоких температурах  $T$  ( $> 3\div 4$ ) $\times 10^3$  К и до  $10^5$  К), сами требующие системы охлаждения подложки [12].

Однако в литературных источниках нет единой модели по предельным тепловым нагрузкам и термическим напряжениям  $\sigma$ , которая позволит рассчитывать тепловые потоки плавления  $q_{пл.}$ , сжатия  $q_{сж.}$  и растяжения  $q_{раст.}$ , время  $\tau$  полета частиц порошка, его размеры и толщину  $\delta$  покрытия, что требуется разработать.

Весьма мало рассмотрены процессы нанесения напыления порошков из природных материалов. В основном изучаются напыления соединений металлоидного типа оксидных покрытий [12-15].

Не исследованы [12-15] инструменты для напыления природных материалов детонационным высокотемпературным пульсирующим двухфазным факелом на металл с целью создания КПП и КПС для системы охлаждения.

Не рассмотрены интегрированные системы с порошковыми напылением и КПС с кипением, с использованием струйных способов с кипением на покрытии, учитывающие совместный потенциал  $\Delta P_{кап+г.}$  [5-15].

Предстоящее исследование [1-4] явится развитием разработок теплоэнергетических установок ТЭУ (выбор теплоохлаждоителя, вид циркуляции, материала интенсификаторов, давления (разрежения), подвода и вида энергии, ориентации). Разработана область применения новой КПС, состоящей из структур и КПП, многие из которых применяются на предприятиях.

Для управления энергетическими процессами нами предлагается разделить общую энергию на две составляющие: энергию тепловой волны, взрывообразно возникшего парового зародыша, и энергию сжатого парового потока, что также важно для моделирования и аналогии процессов кипения в порах структуры (покрытия) [2,3]. Этот принцип используется для получения порошков.

Поэтому в данной работе разрабатываются режимы регулирования напыления естественных минеральных сред, устанавливаются предельные области тепловых нагрузок, пути интенсификации процесса напыления и управления тепловой волной в термоинструменте и в покрытии, исследуется механизм процессов теплообмена с помощью голографии, фото – и киносъемки, теории термоупругости и интегрального эксперимента.

Из введения читатель должен понять, что было сделано и зачем. Поэтому в нем представляется изучаемая проблема и поясняется, что является самым важным в вашем исследовании и по какой причине.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Термоинструмент для напыления нанесением порошка покрытия представлен на рисунках 1, 2 и 3 позволяет производить напыление пульсирующей двухфазной детонационной высокотемпературной струей. Порошком служили частицы минеральной среды (кварцит, гранит, тешенит, мрамор, порфит и туф).



Рис. 1. Установка, выполненная в виде огнеструйной горелки ракетного типа 1. Камеры сгорания и сверхзвукового сопла 2. Охлаждение – КПП

Fig. 1. Installation made in the form of a rocket-type flame-jet burner 1. Combustion chamber and supersonic nozzle 2. Cooling - CPC

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



Рис. 2. Установка 1 для производственной линии. Обозначения см. на Рис. 1

Fig. 2. Installation 1 for the production line. See Fig. 1 for designations

Термоинструмент (см. рис. 1,3) за счет автоматического устройства позволяет

управлять режимами создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела  $L$ . Контролируется качество покрытия и экономится расход горючего и окислителя. Вязкие и высокопористые материалы (туф) напылялись с оплавлением покрытия.

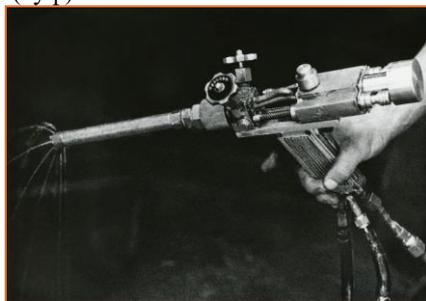


Рис. 3. Термоинструмент с встроенным автоматическим устройством в ждущем режиме

Fig. 3. Thermal tool with integrated automatic device in standby mode

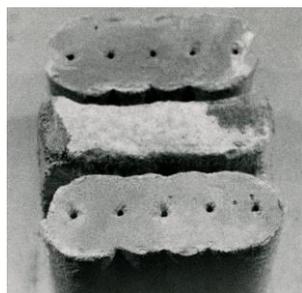
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для проведения эксперимента с ракетными горелками (инструментом) применялась вытеснительная схема питания горелки (вода из баллона вытеснялась воздухом). В качестве горючего использовали керосин, окислителя – кислород. В системе охлаждения применялись вода и пористые покрытия.

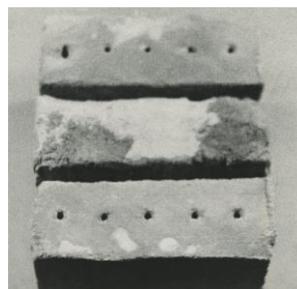
Тепловые потоки  $q$  струи термоинструмента измерялись датчиком из медного цилиндра, которому с торца подводится  $q$ , а с другой стороны, торец охлаждается водой. Поверхность цилиндра теплоизолирована керамикой на основе диоксида циркония. В цилиндре размещаются две хромель-алюминиевые термопары. Цилиндр крепился к покрытию с площадью, большей пятна торможения.

Для определения удельных тепловых потоков  $q$  на оси струи и в пятне торможения (на покрытии) по радиусу  $r$  измерялся расход  $G$ , давление  $P$  и температуры  $T$  охладителя, с целью сведения теплового баланса.

Порошки из природного материала приготавливались после обработки массива горелкой ракетного типа [1-4]. Другой способ получения порошков заключался в приготовлении специальных форм из необходимого материала и их взрывания, что позволяло применять упрочняющие технологии для создания покрытий. С этой целью производились исследования моделей из песчано-цементной смеси, представляющих собой замкнутый объем, ограниченный в одном случае системой сопряженных эллиптических поверхностей, в фокусах которых расположены шпуры (модель №2), а в другом случае ограниченный прямолинейными свободными поверхностями (модель №1) (рис. 4).



А) Модель №1  
A) Model №1



Б) Модель №2  
B) Model №2

Рис. 4. Общий вид моделей:

А) Модель №1 с эллиптическими свободными поверхностями,  
Б) Модель №2 с прямолинейными свободными поверхностями

Fig. 4. General view of the models:

A) Model №1 with elliptical free surfaces,  
B) Model №2 with rectilinear free surfaces

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Модель А), рис. 4 состояла из четырех сопряженных эллиптических цилиндров с эксцентриситетом 0.47, в фокусах которых располагались шпуры диаметром  $d_{ш} 5 \times 10^{-3}$  м глубиной  $h 50 \times 10^{-3}$  м.

Размер среднего куска рассчитывался по формуле

$$d_{cp} = \frac{\sum_1^n d_i \times w_i}{\sum w_i},$$

где  $d_i$  – средний размер  $i$  – ой фракции, мм;  $w_i$  – выход  $i$  – ой фракции, %.

На рис. 5 представлено распределение по фракциям гранулометрического состава.

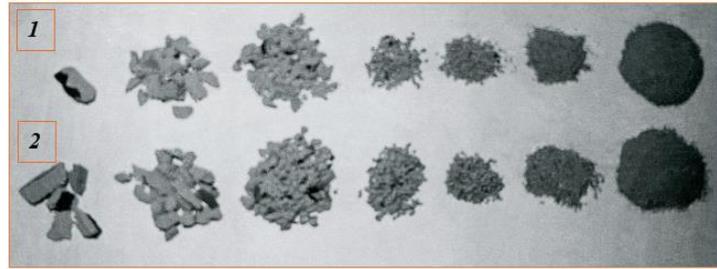


Рис. 5. Распределение по фракциям гранулометрического состава: 1) – для модели с эллиптической свободной поверхностью; 2) – для модели с прямолинейной свободной поверхностью

Fig. 5. Distribution by fractions of granulometric composition: 1) - for the model with elliptical free surface; 2) - for the model with rectilinear free surface

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Величина суммарной вновь образованной поверхности

$$S_H = \frac{6}{\gamma} \sum_1^n \frac{P_i}{d_i} - S_0,$$

где  $n$  – число фракций;  $P_i$  – вес каждой фракции, г;  $\gamma$  – удельный вес материала, г/см<sup>3</sup>;  $S_0$  – первоначальная поверхность модели, см<sup>2</sup>.

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показывают, что для модели №1 выход отдельных классов от 0 до  $2 \times 10^{-3}$  м составил 12.5%, а для модели №2 – 8.6 %. Кроме то, возрастает степень упрочнения частиц порошка. Для проведения экспериментов по влиянию эксцентриситета эллиптических цилиндров на качество дробления (рис. 6, 7) выбирались две модели: Модель №1:  $\varepsilon = 0.74$ . Модель №2:  $\varepsilon = 0.47$ .

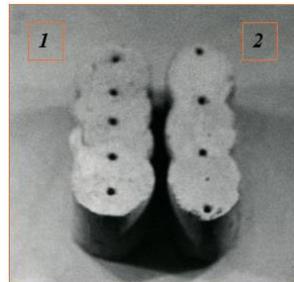


Рис. 6. Общий вид моделей:

- 1) Модель №1 с эксцентриситетом 0.74;
- 2) Модель №2 с эксцентриситетом 0.47

Fig. 6. General view of the models:

- 1) Model №1 with an eccentricity of 0.74;
- 2) Model № 2 with eccentricity 0.47

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты ситового анализа гранулометрического состава показали, что для модели №1 выход класса  $(0 \div 2) \times 10^{-3}$  м дает 27.2%, а для модели №2 – 18.2%. Данная технология позволяет увеличивать степень упрочнения порошка.

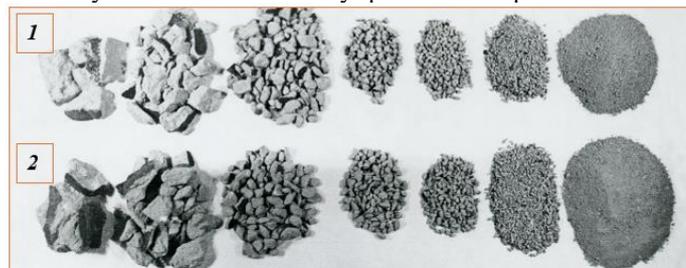


Рис. 7. Общий вид распределения по фракциям массы моделей:

- 1) Модель №1 с эксцентриситетом 0.74;
- 2) Модель №2 с эксцентриситетом 0.47

Fig. 7. General view of the mass fraction distribution of the models:

- 1) Model №1 with an eccentricity of 0.74;
- 2) Model №2 with eccentricity 0.47

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Эксцентриситет эллипса

$$\varepsilon = \frac{c}{a},$$

где  $2c$  – расстояние между фокусами;  $2a$  – длина большой оси. Высота эллиптических цилиндров  $h = 95 \times 10^{-3}$  м.

Для напыления порошка частицы отбирались по крупности:  $0.1 \times 10^{-3}$  м – 3.1%;  $0.25 \times 10^{-3}$  м – 4.2%;  $0.5 \times 10^{-3}$  м – 7.3%.

Упрочняющая технология производства порошков получается за счет разделения энергии взрыва в фокусе эллиптического цилиндра на энергию сжатых газов и энергию волны. Происходит синергический эффект суммирования этих энергий в каждом из фокусов цилиндра. Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз [2,3].

Использованы детонационные высокотемпературные пульсирующие двухфазные факелы керосино-кислородного термоинструмента, позволяющие дожигать горючее на поверхности покрытия с  $\alpha = 0.6 \div 0.8$ . Это позволяет существенно увеличить удельные тепловые потоки  $q$  при небольшом перегреве  $\Delta T$  покрытия, которые могут быть до шести раз выше по сравнению с обычным процессом сжигания. Максимальные  $q$  на покрытии достигали величины  $(2 \div 15) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 8, 9).



Рис. 8. Зарегистрирована структурная спиновая детонация факела (восемь участков) *Fig. 8. Structural spin detonation of the plume (eight sites) recorded*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Граниты, кварциты и тешениты напылялись без оплавления. В то же время вязкие высокопористые материалы преднамеренно подвергались некоторой степени оплавления (туф).

За счет системы управления термоинструментом регулировалась длина  $L$  детонационной струи, истекающей из сопла.



Рис. 9. Структурная спиновая детонация факела с вздутием струи на конечном участке *Fig. 9. Structural spin detonation of the plume with jet implosion at the end section*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Частота колебаний давления на покрытии составляла около 200 Гц, процесс напыления протекал стабильно. Температура струи находилась в пределах  $(3000 \div 850)$  °С, радиусы струи  $r_a = 3 \times 10^{-3}$  м,  $r_c = 10 \times 10^{-3}$  м.

Зависимость предельных тепловых потоков  $q$ , вызывающих напряжения  $\sigma$  сжатия, растяжения и оплавления различных природных материалов, представлены в работах [1,4]. Определены различные толщины отрывающихся частиц (шелушек) покрытий в зависимости от времени  $\tau$  подачи теплового потока. Экспериментальное подтверждение проведено за счет скоростной киносъемки СКС-1М, когда определялось время процесса  $\tau$  и размер оторвавшейся частицы  $\delta$ .

На рисунке 10 показано взаимодействие детонационного факела с поверхностью. Автоматическая система управления устанавливает оптимальное расстояние струи от среза сопла до покрытия. Формируется оптимальное пятно растекания струи с установкой угла оси горелки к покрытию. Выброс струй воды имеет технологическое значение для формирования покрытия.

Поперечная скорость участка воспламенения спиновое детонационного факела (см. рис. 8-10) определяется из наклона к образующей спирального следа. Поскольку угол наклона близок к 45 градусам, то поперечная скорость вдвое превышает скорость звука в газовой струе. На рис. 8 эта волна сделала восемь полных оборотов. Процесс дожигания горючего (керосина) протекает устойчиво на покрытии, непрерывно и наблюдается за ударной волной, а периодичность воспламенения связана с отрывом горения газа от фронта ударной волны.

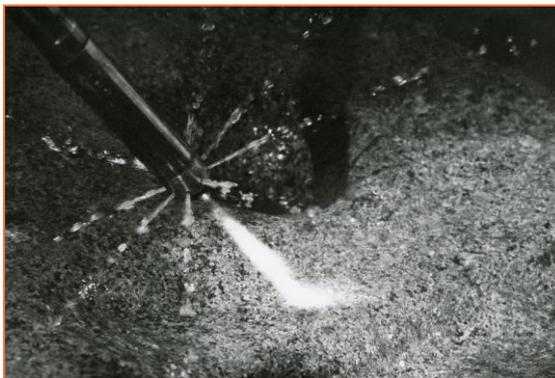


Рис. 10. Взаимодействие детонационного факела с гранитной поверхностью *Fig. 10. Interaction of the detonation plume with the granite surface*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В целом, стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на покрытии КПП в виде сверхзвукового потока смеси, аналогично процессам в ударных трубах.

Предельная область работы тепловых нагрузок для КПП из естественных (природных) материалов, не имеющих оплавления поверхности, для поддерживаемого перегрева покрытия  $\Delta T = T_{ст} - T_n = (20 \div 75)$  К, дает следующие величины: для тешенитных покрытий –  $(2.2 \div 4) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; для гранитных покрытий –  $(4 \div 6.2) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; для кварцевых покрытий –  $(6.2 \div 15) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Полученные области  $q$  значительно превосходят такие высокофорсированные системы, как кипение в тонких пленках и в большом объеме, кипение в сетчатых фитилях тепловых труб.

#### Результаты (Results)

Голографический стенд представлен в [3, 4]. Представим интерференционные голограммы КПП, выполненных из гранита с пористостью  $\varepsilon = 5\%$ , вязкой породы с  $\varepsilon = 30\%$  - туфа и мрамора. Покрытия могут создавать среду с различной акустической жесткостью управлять температурным полем в поверхности ограждения (рис. 11).



Рис. 11. Голографические интерферограммы покрытия из туфа *Fig. 11. Holographic interferograms of the tuff coating*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Покрытия с малой пористостью (гранит рис. 12) находятся в сильно напряженном состоянии по сравнению с вязкими и пористыми средами (туф, мрамор, см. рис 11 и рис.

13). Рост  $q$  в два раза приводило у них к росту деформации на поверхности до трех раз, тогда как у образцов с большой пористостью – в полтора раза. Количество полос выше у покрытий гранита и мрамора, т.к. в них выше термические напряжения.

Предотвращение разрушения покрытий факелом с совместным действием отраженных волн от интерференции и дифракции волн достигается экранами, показанными на рисунках 11-13.



Рис. 12. Голографические интерферограммы покрытия из гранита

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Интерферограммы позволили обнаружить на поверхности покрытий дефекты и трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы (см. рис. 13). Более того, в практике даже используется визуальное наблюдение для прогнозирования разрушения.

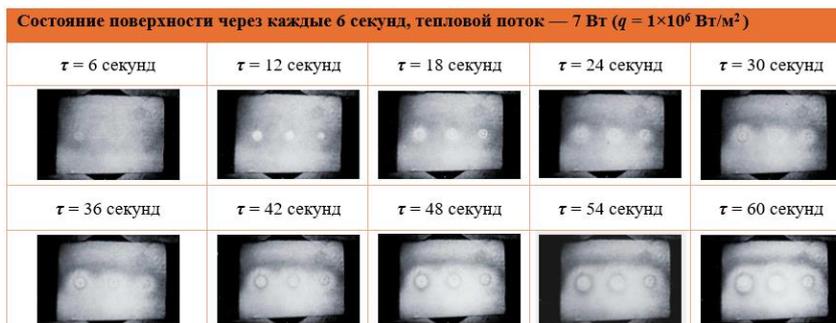


Рис. 13. Голографические интерферограммы покрытия из мрамора

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оценка действия напряжений покрытий уменьшает вероятность возникновения трещин при создании устройств и позволяет управлять развитием опасных трещин. Покрытие с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, который поглощает ударные и детонационные волны факела термоинструмента.

#### Обсуждение (Discussions)

Исследования современных технологий поверхностей и покрытий обычно рассматривают целостность термически напыленных покрытий металлов и сплавов на основе воздействия напряжений растяжения и деформаций.

Однако для предельного состояния природных покрытий из минеральных сред при определенных размерах  $\delta$  частиц и времени подачи удельного теплового потока решающую роль в разрушении покрытия имеют напряжения сжатия [1-4].

Более того, различные методы термического напыления (атмосферно-плазменный процесс; высокоскоростной кислородо-топливный, высокоскоростной воздушно-топливный [12-15] дают различную микроструктуру и отношение напряжения сжатия, растяжения и сдвига к деформации.

Это связано с прочностью сцепления между частицами минеральной среды, т.к. полностью или частично расплавленные частицы порошка металлов ударяются и затвердевают на подложке, а степень сцепления между частицами металлов может составлять всего 20÷80 % площади поверхности границ частицы.

Создаваемое термическим способом КПП будет всегда анизотропно, что имеет преимущества в процессе охлаждения, т.к. активнее участвуют капиллярные силы в

равномерности распределения охлаждаемой жидкости.

Для исследования с помощью интерфериметрии точкой отсчета всегда будет остаточная деформация в КПП, определяемая сетью мелких трещин, которые не исчезают при снятии тепловой нагрузки (см. рис. 11-13).

Для термического напыления металлов и сплавов стремятся к максимальному расплавлению частицы, что положительно влияет на коррозионную стойкость КПП [12-15]. Для частиц минеральной среды проблема кавитационного эрозионного износа КПП не является основной.

Расшифровка интерферограмм (см. рис. 11-13) для всех покрытий показывает нелинейную кривую перемещения частиц [1-4], причем кислородно-керосиновое напыление имеет преимущество в том, что расплавление частиц на КПП достигается с помощью спинового детонационного факела на поверхности покрытия. Это значительно снижает разрушение частиц порошка по границам раздела нерасплавленных частиц в КПП.

Для частиц туфа высокая степень расплавления частиц достигается за счет увеличения мощности термоинструмента путем применения спаренных горелок. При этом расплавляется большое количество случайных дефектов при изготовлении КПП, а также имеющиеся пустоты и каверны. Целостность КПП обеспечит самую высокую эрозионную стойкость покрытия.

#### **Заключение (Conclusions)**

Исследован процесс создания покрытий из природных материалов гранита, кварцита, тешенита, мрамора и туфа. Применен способ образования порошков с помощью управления энергией волны и газов в фокусах эллиптических цилиндров, что позволило провести упрочнение материала и повысить выход мелких фракций природных материалов в диапазоне гранулометрического состава  $(0\div 2)\times 10^{-3}$  м.

Создан термоинструмент, имеющий спиновую структуру детонационного факела, дожигаемого на поверхности природного покрытия, и имеющей пульсирующую двухфазную высокотемпературную высокоскоростную струю. Поперечная скорость участка воспламенения спинового факела близка к скорости детонации. Интенсификация теплообмена на природном покрытии превосходит кипение в пленках, большом объеме и сетчатых тепловых трубах.

Анализ голографических интерферограмм показал, что имея точку отсчета в виде остаточной деформации в материале, обнаружена сеть мелких трещин, которые не исчезли при снятии тепловой нагрузки и наблюдались на поверхности. Такие наблюдения служат в качестве прогноза поведения материала в случае диссипации энергии у вершины большой трещины и предсказывают состояние прочности.

Обнаружена нелинейная кривая перемещения частиц, подчеркивая, что в механизме разрушения к упругому поведению материала добавляется его пластичность, оптические методы исследования, дополненные аналитическим решением термоупругостной задачи позволили уточнить механизм процессов в покрытиях и рассчитывать предельные удельные тепловые потоки и напряжения.

#### **Литература**

1. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Моделирование термических напряжений, разрушающих пористые покрытие теплообменных поверхностей энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. № 21(3). С. 117-125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125>
2. Genbach A.A., et al. Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines // Energy. 2020. № 199:117458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>
3. Genbach A.A., et al. Boiling crisis in porous structures // Energy. 2022. № 259:125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
4. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Илиев И.К. Пути повышения эффективности охлаждения камер сгорания и сопел ГТУ // Вестник КГЭУ. Т. 13. №3(51). 2021. – с. 114-134.
5. Литвинцова Ю.Е., Кузьменков Д.М., Мурадян К.Ю., Делов М.И., Куценко К.В. Диагностика переходных режимов теплообмена при кипении в большом объеме на основе вейвлет-преобразования температурных флуктуаций // Теплоэнергетика. 2023. № 11. с. 42–53. DOI:10.56304/S0040363623110103
6. Jena M., Mishra P.C., Sahoo S.S. Охлаждение металлических поверхностей распылением: прогресс в механизмах его реализации (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 8. С. 27–51. DOI:

10.56304/S0040363623080052

7. Дмитриев А.С., Клименко А.В. Перспективы использования двумерных наноматериалов в энергетических технологиях (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 8. С. 3–26. DOI: 10.56304/S0040363623080015

8. Santiphong Klayborworn, Watit Pakdee. Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. Vol. 14:100451. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100451>

9. Miao Qian, et al. Study on heat dissipation performance of a lattice porous structures under jet impingement cooling // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 49:103244. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103244>

10. Yan-Hua Huang, et al. Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. Iss. 4. pp. 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.03.007>

11. Xinghui Wu, et al. An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 45:102921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921>

12. Кравченко И.Н., Карелина М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А. Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015. № 15(3). С. 19-27. <https://doi.org/10.12737/12590>

13. Клинов С.В., Косарев В.Ф., Желнина А.С. Нанесение методом ХГН композиционных (металл – металл) покрытий // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2016. № 47. С. 135-153. DOI:10.15593/2224-9982/2016.47.08

14. Бабин С.В., Егоров Е.Н., Фурсов А.А. Влияние материала подложки и угла напыления на макроструктуру капиллярно-пористого покрытия из титана // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 3(660). С. 61-67. DOI:10.18698/0536-1044-2015-3-61-67

15. Дементьев А.И., Подоппелов Е.В., Антонов Л.А., Корчевин Н.А. Математическая модель тепловых процессов в слое пористого металлического покрытия // Иркутский государственный университет путей и сообщений. Машиностроение и машиноведение. 2015. №2(46). С. 65-68

#### Авторы публикации

**Генбач Александр Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Теплоэнергетика», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева». E-mail: a.genbach@aues.kz, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>.

**Бондарцев Давид Юрьевич** — доктор философии (PhD), профессор-преподаватель кафедры «Теплоэнергетика», НАО Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева». E-mail: d.bondartsev@aues.kz, ORCID: 0000-0001-8778-7851, Тел.: +7-747-231-29-91.

#### References

1. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Modeling of thermal stresses destroying the porous coating of heat-exchange surfaces of power plants // Power engineering: research, equipment, technology. 2019;21(3):117-125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125>

2. Genbach A.A., et al. Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines // Energy. 2020. № 199:117458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>

3. Genbach A.A., et al. Boiling crisis in porous structures // Energy. 2022. № 259:125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>

4. Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Puti povysheniya effektivnosti okhlazhdeniya kamer sgoraniya i sopol GTU // Vestnik KGEU. Т. 13. №3(51). 2021. – с. 114-134.

5. Litvintsova Yu.E., Kuz'menkov D.M., Muradyan K.Yu., Delov M.I., Kutsenko K.V. Diagnostika perekhodnykh rezhimov teploobmena pri kipenii v bol'shom ob'eme na osnove veivlet-preobrazovaniya temperaturnykh fluktuatsii // Теплоэнергетика. 2023. № 11. с. 42–53. DOI:10.56304/S0040363623110103

6. Jena M., Mishra P.C., Sahoo S.S. Okhlazhdenie metallicheskich poverkhnostei raspilyeniem: progress v mekhanizmax ego realizatsii (obzor) // Теплоэнергетика. 2023. № 8. С. 27–51. DOI: 10.56304/S0040363623080052

7. Dmitriev A.S., Klimenko A.V. Perspektivy ispol'zovaniya dvumernykh nanomaterialov v

energeticheskikh tekhnologiyakh (obzor) // Teploenergetika. 2023. № 8. S. 3–26. DOI: 10.56304/S0040363623080015

8. Santiphong Klayborworn, Watit Pakdee. Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. Vol. 14:100451. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100451>

9. Miao Qian, et at. Study on heat dissipation performance of a lattice porous structures under jet impingement cooling // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 49:103244. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103244>

10. Yan-Hua Huang, et at. Physical and mechanical behavior of granite containing pre-existing holes after high temperature treatment // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 17. Iss. 4. pp. 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.03.007>

11. Xinghui Wu, et at. An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 45:102921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921>

12. Kravchenko I.N., Karelina M.Yu., Zubrilina E.M., Kolomeichenko A.A. Resursosberegayushchie tekhnologii polucheniya funktsional'nykh nanostrukturirovannykh pokrytii vysokoskorostnymi metodami naneseniya // Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2015. № 15(3). S. 19-27. <https://doi.org/10.12737/12590>

13. Klinkov S.V., Kosarev V.F., Zhelnina A.S. Nanesenie metodom KhGN kompozitsionnykh (metall – metall) pokrytii // Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. 2016. № 47. S. 135-153. DOI:10.15593/2224-9982/2016.47.08

14. Babin S.V., Egorov E.N., Fursov A.A. Vliyanie materiala podlozhki i ugla napyleniya na makrostrukturu kapillyarno-poristogo pokrytiya iz titana // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie. 2015. № 3(660). S. 61-67. DOI:10.18698/0536-1044-2015-3-61-67

15. Dement'ev A.I., Podoplelov E.V., Antonov L.A., Korchevin N.A. Matematicheskaya model' teplovykh protsessov v sloe poristogo metallichesкого pokrytiya // Irkutskii gosudarstvennyi universitet putei i soobshchenii. Mashinostroenie i mashinovedenie. 2015. №2(46). S. 65-68

#### Authors of the publication

**Aleksandr A Genbach** — NCJC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev».

**David Yu Bondartsev** — NCJC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev».

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** 16.03.2025 г.

**Отредактировано** 27.03.2025 г.

**Принято** 01.04.2025 г.



## СТРУКТУРНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Плотникова Л.В., Калинина М.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

mikhailovalv@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Сложность структуры предприятий целлюлозно-бумажной отрасли промышленности определяется большим количеством элементов в составе теплотехнологических схем производства, обратными потоками, связями с окружающей средой в виде потребляемых топливно-энергетических ресурсов и сбросной энергии в виде вторичных энергетических ресурсов. Для таких предприятий вариантов повышения энергоэффективности с включением энергосберегающего оборудования может быть множество. Поэтому для выбора эффективного варианта предложено использование структурно-термодинамического подхода к анализу теплотехнологических схем.

**ЦЕЛЬ.** Разработка алгоритма структурно-термодинамического анализа, позволяющего преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей, данные о которых зачастую отсутствуют на целлюлозно-бумажных производствах, но являются необходимыми для оценки термодинамической эффективности использования сбросной энергии.

**МЕТОДЫ.** Для достижения обозначенной цели используется системный подход с применением матричного анализа и булевой алгебры, эксергетический метод термодинамического анализа, а также разработано программное обеспечение, объединяющее перечисленные методы.

**РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для теплотехнологической схемы производства бумаги определена оптимальная последовательность термодинамического расчета с минимальным количеством итераций/допущений на участках условного разрыва потоков схемы. В результате термодинамического анализа получены данные о тепловой и эксергетической эффективности элементов теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства, а также данные о потоках, использование которых обеспечит организацию оптимальной системы утилизации вторичной энергии.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработанное программное обеспечение структурно-термодинамического анализа было реализовано при оценке термодинамической эффективности теплотехнологической схемы производства бумаги. Выявлено минимальное количество потоков схемы – 20 потоков, условный разрыв которых позволяет полностью выполнить термодинамический расчет схемы с минимальным количеством итераций и определить достоверные значения параметров энергетических потоков. Результаты термодинамического анализа показали, что наиболее низкий эксергетический к.п.д – у аппаратов с такими сбрасываемыми потоками как теплота охлаждения верхнего продукта колонн, отработанного воздуха после процесса сушки в бумагоделательной машине, оборотной воды, сточных вод. Поэтому именно в такие аппараты следует осуществлять возврат энергии сбросных потоков наибольшего эксергетического потенциала для повышения термодинамической эффективности теплотехнологической схемы в целом.

**Ключевые слова:** структурный анализ; обратная связь; итерация; термодинамический анализ; эксергия; энергоэффективность; вторичные энергоресурсы; теплотехнологическая схема; целлюлозно-бумажное производство; процесс сушки.

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2025-458 от 17.01.2025.

**Для цитирования:** Плотникова Л.В., Калинина М.В. Структурно-термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 218 -232. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232.

## STRUCTURAL AND THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE THERMAL TECHNOLOGY SCHEME OF PULP AND PAPER PRODUCTION

Plotnikova L.V., Kalinina M.V.  
Kazan State Power Engineering University, Kazan Russia  
mikhailovalv@mail.ru

**Abstract:** *RELEVANCE.* The complexity of the structure of enterprises in the pulp and paper industry is determined by the large number of elements in the thermal technology schemes of production, reverse flows, connections with the environment in the form of consumed fuel and energy resources and waste energy in the form of secondary energy resources. For such enterprises, there may be many options for improving energy efficiency with the inclusion of energy-saving equipment. Therefore, the use of a structural and thermodynamic approach to the analysis of thermal technology schemes is proposed to select an effective option. *purpose.* Development of an algorithm for structural and thermodynamic analysis, which makes it possible to overcome the ambiguity of the initial data and calculate reliable values of the parameters of external energy sources, data on which are often not available in pulp and paper industries, but are necessary to assess the thermodynamic efficiency of waste energy use. *METHODS.* To achieve this goal, a systematic approach is used using matrix analysis and Boolean algebra, the exergetic method of thermodynamic analysis, and software has been developed that combines these methods. *results.* For the thermal technology scheme of paper production, the optimal sequence of thermodynamic calculations with a minimum number of iterations/assumptions in the sections of the conditional flow gap of the scheme has been determined. As a result of the thermodynamic analysis, data were obtained on the thermal and exergetic efficiency of the elements of the thermal technology scheme of pulp and paper production, as well as data on flows, the use of which will ensure the organization of an optimal system for recycling secondary energy. *Conclusion.* The developed software for structural and thermodynamic analysis was implemented to evaluate the thermodynamic efficiency of the thermal technology scheme of paper production. The minimum number of flows of the scheme has been revealed – 20 flows, the conditional break of which makes it possible to fully perform the thermodynamic calculation of the scheme with a minimum number of iterations and determine reliable values of the energy flow parameters. The results of the thermodynamic analysis showed that the lowest exergetic efficiency is for devices with such discharge flows as the heat of cooling of the upper product of the columns, exhaust air after the drying process in a paper machine, recycled water, and wastewater. Therefore, it is in such devices that the energy of the discharge streams of the greatest exergetic potential should be returned to increase the thermodynamic efficiency of the heat technology scheme as a whole.

**Keywords:** structural analysis; feedback; iteration; thermodynamic analysis; exergy; energy efficiency; secondary energy resources; thermal technology scheme; pulp and paper production; drying process.

**Acknowledgments:** The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2025-458 dated January 17, 2025.

**For citation:** Plotnikova L.V., Kalinina M.V. Structural and thermodynamic analysis of the thermal technology scheme of pulp and paper production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 218-232. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-218-232.

### **Введение (Introduction)**

На сегодняшний день важным элементом энергетической политики России является эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Переход на энергосберегающие технологии, включая внедрение систем рекуперации вторичных энергоресурсов, то есть их возврата в технологическую линию, является одним из приоритетных направлений энергетической политики РФ.

Сложные схемы промышленных предприятий, таких как целлюлозно-бумажное производство, располагают ресурсами энергосбережения в виде сбрасываемых в окружающую среду потоков энергии – вторичных энергоресурсов (ВЭР) [1]. Это потоки отработанного горячего влажного воздуха сушильных установок, теплота конденсата, энергия охлаждения полупродуктов, оборотной воды.

Применение энергосберегающих технологий с использованием теплоты ВЭР требует установки специального утилизационного оборудования, которое в свою очередь требует соответствующих капитальных вложений. Выбрать наилучший вариант энергосберегающего мероприятия сложно ввиду следующих причин [1, 2]:

- масштабы существующих производств, сложность структуры производств, значительное количество сбрасываемых потоков энергии;
- данные о параметрах потоков ВЭР зачастую отсутствуют на производствах, но являются необходимыми для оценки эффективности использования сбросной теплоты;
- наличие большого количества элементов теплотехнологических схем, которые связаны прямыми и обратными связями. Это превращает систему в сложноструктурированную и замкнутую, что приводит к многочисленным итерационным согласованиям, а при отсутствии некоторых данных о параметрах ВЭР и к накоплению ошибки при проведении термодинамических расчетов.

Для перебора возможных вариантов включения теплоутилизационных установок и оценки критериев выбора энергосберегающего варианта актуальна разработка программного обеспечения, объединяющего структурный и термодинамический виды анализа. Ввиду большого количества элементов в системе с обратными связями, которые усложняют расчет схемы, автоматизированное определение оптимальной последовательности расчета элементов и определения минимального количества мест, в которых можно задаться параметрами потоков, является важной задачей [2].

В связи с этим *целью работы* является разработка алгоритма структурно-термодинамического анализа, позволяющего преодолеть неоднозначность исходных данных и рассчитать достоверные значения параметров внешних энергоносителей, данные о которых зачастую отсутствуют на целлюлозно-бумажных производствах, но являются необходимыми для оценки термодинамической эффективности использования ВЭР. Выявленная оптимальная последовательность элементов значительно упростит дальнейшие действия по обеспечению организации энергоэффективной системы производства.

*Научная и практическая новизна исследования.* На основе предлагаемого алгоритма проведения структурно-термодинамического анализа разработан программный продукт, позволяющий автоматизированно проводить последовательный термодинамический расчет многоконтурной теплотехнологической схемы с минимумом итераций и минимизацией ошибки, что позволило определить тепловой и эксергетический потенциал потоков ВЭР, выбрать потоки для дальнейшей утилизации. Разработанный алгоритм можно использовать для решения вопроса по возврату вторичной энергии в технологическую схему с целью утилизации сбрасываемых энергетических потоков, а также для организации эффективной структуры многоконтурных теплоэнергетических систем различных промышленных производств, где может иметь место проблема сложноструктурированных схем.

#### ***Литературный обзор (Literature review)***

Известен алгоритм структурного анализа теплотехнологических схем, применяемого в работах научной школы Ю.Г. Назмеева [2 - 4]:

1. построение матрицы смежности теплотехнологической схемы;
2. определение связей между элементами схемы, а также выделение внешних и внутренних связей;
3. выделение замкнутых и незамкнутых последовательностей элементов схемы;
4. определение количества контуров в теплотехнологической схеме, составляющих их элементов, выявление наличия комплексов взаимосвязанных контуров;
5. определение минимального количества потоков, условный разрыв которых позволяет оптимизировать схему и получить ациклический граф;
6. получение последовательности для термодинамических расчетов путем разрыва минимального количества потоков, определенных в предыдущем шаге алгоритма.

Структурный анализ позволяет представить сложноструктурированные теплотехнологические схемы в виде незамкнутой последовательности элементов и позволяет определить условно-линейную последовательность расчета. Для теплоэнергетических систем это является возможностью выявления наилучшей последовательности расчета тепловых процессов схем, то есть с помощью анализа структуры упрощается следующий этап – последовательный расчет теплоэнергетической системы с целью анализа термодинамической эффективности энергопотребления существующей технологии [5, 6].

Структурный анализ до использования его в теплотехнологических схемах находил применение при проведении анализа химико-технологических схем [7 – 10], где отмечается сложность расчета таких схем в связи с большим количеством разнотипного оборудования

и наличия в схемах большого количества обратных технологических потоков. Основоположителем применения структурного подхода в рамках системного анализа для химико-технологических схем в СССР являлся Г.М. Островский, развитием идей которого в настоящее время занимаются его ученики Н.Н. Зиятдинов и Т.В. Лаптева [8, 9]. Применение структурного анализа в химической технологии позволило избежать проблемы многочисленных итераций и снизить вероятность ошибки при расчётах схем.

Применительно же к теплотехнологическим схемам предприятий со значительными резервами энергосбережения в виде вторичных энергетических ресурсов структурный анализ позволит не только определить оптимальную последовательность расчета с минимум итераций и ошибок, но и получить достоверные данные о термодинамическом потенциале потоков ВЭР, что важно при организации систем их утилизации [2, 11].

Для оценки потенциала потоков вторичных энергоресурсов применяют термодинамический анализ, позволяющий проанализировать процесс преобразования теплоты в полезную работу, рассчитать потери работоспособности тепловых потоков, выявить потоки вторичной энергии с наибольшей работоспособностью для их дальнейшей рекуперации [3, 10, 11]. Для оценки термодинамического потенциала потоков и аппаратов применяются эксергетический [12], энтропийный методы, а также метод тепловых балансов. В настоящее время термодинамический метод анализа применяется в нефтехимии [13], на энергогенерирующих предприятиях [14, 15], на объектах топливно-энергетического комплекса [16]. Проводится оценка термодинамической эффективности как всей системы, так и отдельных ее участков.

Эксергетический анализ направлен на определение степени термодинамического совершенства рабочих процессов оборудования. Он позволяет выявить потери энергии от необратимости процессов для каждого элемента и для всей системы в целом, произвести оценку эффективности элементов в составе системы, выявить эффективный способ экономии ресурсов для рассматриваемой системы [3].

Тенденция такова, что актуально соединение двух видов анализа [2, 12] – структурного анализа и термодинамического анализа в рамках так называемого системного анализа с целью минимизации ошибки в условиях неоднозначности и нехватки исходных данных о параметрах энергетических потоков, сокращения затрат времени при выборе энергоэффективного варианта системы утилизации вторичных энергоресурсов для крупнотоннажных промышленных предприятий. Разрабатываемые ранее программные продукты для структурного анализа промышленных систем решали задачи поиска контуров, разрыва циклов, нахождения последовательности расчета, однако такие продукты не включали возможность проведения одновременно термодинамических расчетов [3]. Современная задача состоит в том, чтобы в одном программном продукте была возможность автоматизировать термодинамические расчеты в соответствии с определяемой в рамках структурного анализа последовательностью [2].

Проанализированы программные продукты, которые могут быть использованы для решения вышеобозначенных задач. До данного момента методика проведения системного анализа рассматривала реализацию структурного и термодинамического анализа в разных программных продуктах. То есть при реализации структурного анализа при переводе схемы в цифровую форму вводятся только данные о взаимосвязи элементов и направлении этой связи (потока), а термодинамические параметры (давление, температура, расход, энтальпия и т.п.) к потокам не привязаны. Например, в программах Chemcad и Aspen Hysys можно частично провести термодинамический анализ. А в среде разработки LabVIEW и Matlab Simulink [7] можно построить структуру схемы и привязать параметры к потокам. Но при расчете схем с обратными связями с использованием LabVIEW сохраняется необходимость многократных итераций. Следовательно, оптимальную последовательность расчета в программных продуктах Chemcad, LabVIEW, Matlab Simulink нельзя определить [2].

#### **Методика (Methodology)**

Рассмотрим объединенную методику проведения структурного и термодинамического анализа для теплотехнологической схемы на примере целлюлозно-бумажного производства. Целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) является крупнотоннажным и энергоемким объектом, где затрачивается значительное количество тепловой энергии в виде водяного пара и горячего воздуха. В структуру ЦБП входит более ста элементов, взаимосвязанных энергетическими и технологическими потоками с большим количеством обратных связей. Фрагменты теплотехнологической схемы показаны на Рис. 1 (На Рис. 1а представлен размольно-подготовительный участок, на Рис. 1б –

картоноделательный участок). Из рисунка 1 видно, что в теплотехнологической схеме ЦБП имеется значительное количество обратных связей.

Кроме того, процесс получения бумаги и картона характеризуется значительным потреблением энергии, особенно стоит отметить участок формирования бумажного полотна – бумаго- или картоноделательную машину (Рис. 1б). Норма расхода пара, согласно техническому регламенту, составляет 1,4 Гкал/т продукции, а электрической энергии – 460 кВт·ч/т. В значительном количестве тепловая энергия затрачивается при сушке бумаги или картона воздухом и сушке паром. В итоге образуется сбросная энергия в виде влажного воздуха и конденсата. Отработанный горячий воздух после картоноделательной машины (КДМ) выводится за пределы производственных помещений. Пар, поступающий в сушильные цилиндры КДМ, конденсируется, отдает свою теплоту поверхностям нагрева и частично возвращается в тепловую схему КДМ.

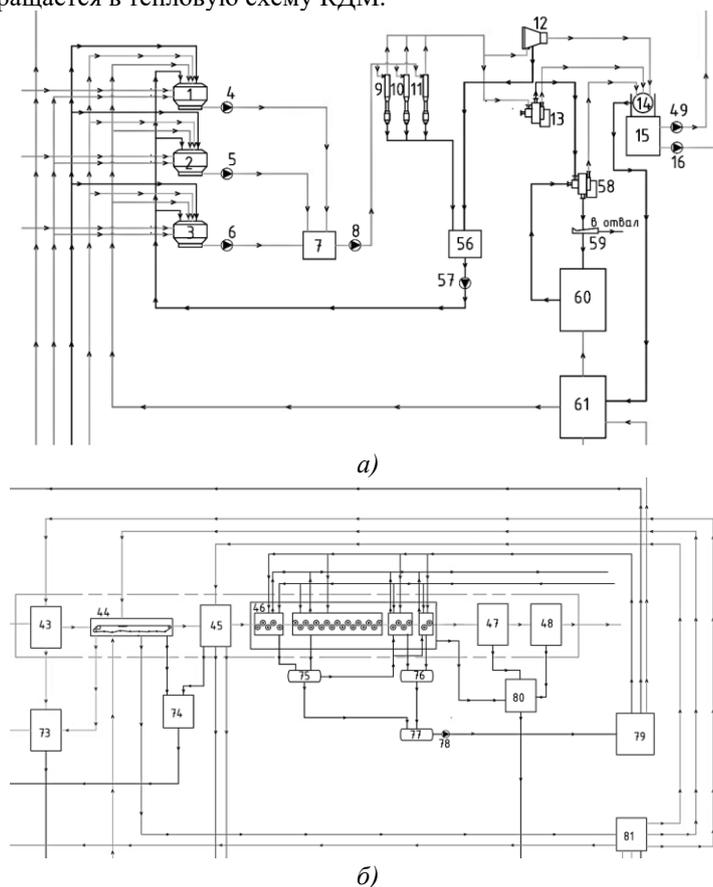


Рис.1. Теплотехнологическая схема (фрагмент) для ЦБП: а) размольно-подготовительный участок; б) – картоноделательный участок; 1-3 – гидроразбавители; 4-6, 8, 16, 49, 57 – насосы; 7, 15, 56, 61 – аккумулирующие бассейны; 9-11 – вихревые очистители; 12 – гидроразбавитель; 13, 58 – сепараторы; 14 – сгуститель; 43 – напорный ящик картоноделательной машины; 44 – сеточная часть картоноделательной машины; 45 – прессовая часть картоноделательной машины; 46 – сушильная часть картоноделательной машины; 47 – машинный каландр; 48 – продольно резательный станок; 59 – вибросортировка; 60 – бак постоянного уровня воды; 73 – бассейн подсеточной воды; 74 – бассейн мокрого брака; 75, 76, 77 – баки для конденсата; 78 – насос; 79 – станция тепловодоснабжения; 80 – бассейн сухого вещества; 81 – бассейн оборотной воды

Fig.1. Thermal technology diagram (fragment) for the CWP: a) grinding and preparatory section; b) - cardboard-making section; 1-3 – hydraulic diluents; 4-6, 8, 16, 49, 57 – pumps; 7, 15, 56, 61 - storage pools; 9-11 – vortex cleaners; 12 – hydraulic diluent; 13, 58 – separators; 14 – thickener; 43 – pressure box of the cardboard making machine; 44 – mesh part of the cardboard making machine; 45 – pressing part of the cardboard making machine; 46 – drying part of the cardboard making machine; 47 – machine calender; 48 – longitudinal cutting machine; 59 – vibrating sorting; 60 is a constant water level tank; 73 is a sub-grid water pool; 74 is a wet waste pool; 75, 76, 77 are condensate tanks; 78 is a pump; 79 is a heat supply station; 80 is a dry matter pool; 81 is a circulating water pool

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

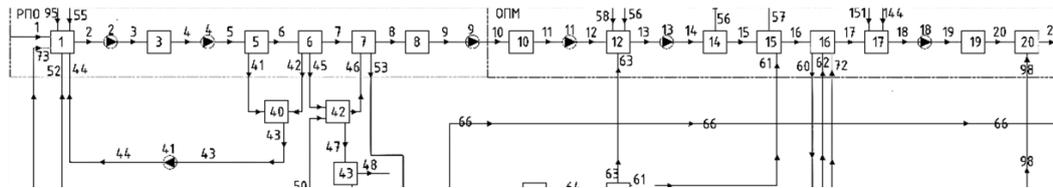
Для реализации методики разработано программное обеспечение (ПО) для одновременного проведения и структурного, и термодинамического анализа [17]. Далее

описываются этапы проведения структурно-термодинамического анализа для теплотехнологической схемы ЦБП.

1. Для осуществления связи термодинамических параметров (давление, температура, расход) потоков теплотехнологической схемы с ее структурой схема преобразуется в ориентированный граф. Вершинами графа становятся элементы схемы, а направленными дугами – потоки схемы. Фрагмент такой структурной схемы (СС) для размольно-подготовительного участка ЦБП (рис. 1а) показан на рисунке 2.

При составлении графа используются правила:

- параллельно работающие аппараты объединяются в один элемент СС;
- в случае разделения потока или объединения потоков в один вводится дополнительный элемент для разделительного узла.



из 3-х элементов или контуров их 2-х элементов, второе перемножение – последовательности из 4-х элементов или контуров из 3-х элементов и т.п. [3, 17]. Элементы, из которых состоят контуры, располагаются на диагонали матрицы, что говорит о том, что связь замкнулась сама на себя. Далее для выявления контуров из элементов, находящихся на диагонали матрицы, предложено использовать алгоритм перебора [17]. Впервые включение метода перебора позволяет найти не только замкнутые последовательности элементов, но и разомкнутые. Что помимо решения проблемы многочисленных итераций позволяет решать проблему недостаточности/неточности данных о параметрах потоков, прежде всего потоков ВЭР.

4. Поиск контуров-циклов и оптимальной последовательности расчета. Проводится запуск ПО на выполнение структурного и последующего термодинамического анализа, скриншоты этапов работы которого были показаны ранее в [17]. Результатами работы ПО является нахождение циклов (контуров) путем поиска единиц на диагонали матрицы с использованием алгоритма перебора (Рис. 4а), нахождение условно разрываемых потоков (Рис. 4б), определение последовательности расчета схемы с минимальным количеством итераций благодаря условному разрыву потоков с наибольшей частотой (Рис. 4в). Так, для рассматриваемого размерно-подготовительного участка схемы последовательность расчета следующая: принимаем исходные данные условно-разрываемого потока номер «2»; на их основе производится расчет аппарата 2, затем рассчитываются аппарат 3; 4; 5; 6; 40; 41, 42, 43, 1, после чего происходит итерационное согласование параметров потока под номером «2»; затем расчет аппаратов 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

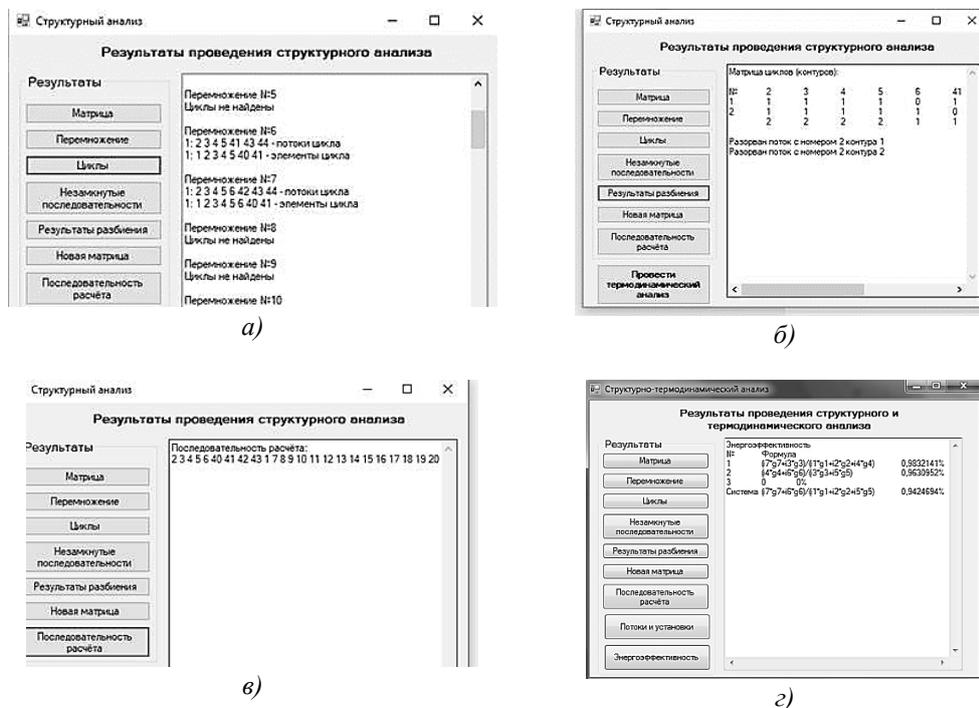


Fig. 4. Stages of work on structural and thermodynamic analysis: a) identification of cycles (contours); б) compilation of a matrix of found cycles and search for conditionally discontinuous flows; в) determination of the calculation sequence with a minimum number of iterations; г) evaluation of the energy efficiency of equipment

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

5. Блок термодинамических расчетов (Рис. 4г). При проведении термодинамических расчетов определяются значения тепловой и эксергетической мощности каждого потока схемы, определяются тепловые и эксергетические КПД аппаратов, блоков (групп аппаратов) и всей теплотехнологической схемы в целом. Среди потоков вторичных энергоресурсов выбираются потоки с наибольшей эксергетической ценностью, наибольшей работоспособностью, которые могут быть полезно использованы в той же теплотехнологической схеме. Ранее предлагалось прежде всего выбирать потоки с

наибольшим коэффициентом ценности теплоты  $K$ , который представлял собой соотношение эксергии к теплоте  $e/q$  [3, 4]. Однако этот коэффициент не учитывал потребность системы в расходе выбираемого потока. Поэтому предложено выбирать потоки с наибольшей эксергией при удовлетворяющем потребителя расходе (с минимальным превышением потребности в расходе потока); под потребителем подразумевается технологический процесс в той же теплотехнологической схеме – источнике ВЭР.

При расчете термодинамической эффективности всей системы для оценки эффективности системы рекуперации ВЭР следует внести следующие изменения в тепловой и эксергетический коэффициенты системного использования (КСИ) [4].

Известен эксергетический КПД<sub>Е</sub> [3]:

$$\text{КПД}_E = \Sigma E'' - \Sigma E' = (\Sigma E' - \Sigma D) / \Sigma E' \quad (1)$$

где  $\Sigma E''$  – отведенная от объекта/системы эксергетическая мощность, кВт;  $\Sigma E'$  – подведенная к объекту/системе эксергетическая мощность, кВт;  $\Sigma D$  – эксергетические потери в объекте/системе.

Тепловой КСИ<sub>Q</sub> для аппарата или всей системы определяет долю использования в аппарате или в системе подведенной тепловой мощности:

$$\text{КСИ}_Q = \Sigma Q'' / \Sigma Q' = (\Sigma Q' - \Sigma Q_{\text{СБР}}) / \Sigma Q', \quad (2)$$

где  $\Sigma Q''$  – отведенная из объекта тепловая мощность, кВт;  $\Sigma Q'$  – подведенная к объекту тепловая мощность, кВт;  $\Sigma Q_{\text{СБР}}$  – тепловая мощность, кВт, отводимых из объекта или системы сбросных потоков (для целлюлозно-бумажного производства это потоки горячего воздуха, конденсата, оборотной воды, теплота охлаждения полупродуктов).

Аналогично рассчитывается эксергетический КСИ<sub>Е</sub>.

КСИ теплотехнологической схемы примет максимально возможное значение только тогда, когда вся отводимая от объекта мощность будет использоваться в системе. То есть КСИ не приблизится к КПД, если остался хотя бы 1 неиспользованный в производстве поток ВЭР. Предлагается при расчёте КСИ не вычитать из числителя мощность потоков ВЭР, невозможных к использованию в данном производстве, что позволит приблизить значение КСИ к значению КПД при использовании всех возможных ВЭР и сделать выбор в пользу эффективного варианта рекуперации ВЭР.

Следовательно, формула (2) примет вид:

$$\text{КСИ}_Q = (\Sigma Q'' - \Sigma Q_{\text{СБР}}) / \Sigma Q' = ((Q_{\text{ВЭР}}' + Q_{\text{ВЭР}}'' + Q_{\text{ПРОД}}) - \Sigma Q_{\text{СБР}}) / \Sigma Q', \quad (3)$$

где  $Q_{\text{ВЭР}}'$  и  $Q_{\text{ВЭР}}''$  – соответственно тепловая мощность потоков ВЭР, которые нашли применение в производстве и тепловая мощность потоков, которые в данном производстве использовать невозможно из-за отсутствия соответствующего потребителя, кВт,  $Q_{\text{ПРОД}}$  – тепловая мощность потока производимого продукта, кВт.

#### **Результаты расчетов (Calculation results)**

По изложенному алгоритму был проведен структурный и термодинамический анализ теплотехнологической схемы целлюлозно-бумажного производства, состоящей из 166-ти элементов тепломассообменного и разделительного оборудования, такого как картоноделательная машина, сушильные установки, теплообменные аппараты, ректификационные колонны, реакторы, сепараторы, циклоны, а также нагнетательное, транспортирующее и емкостное оборудование. Потоки, связывающие эти элементы, превращают технологическую цепочку в многоконтурную схему.

Для полной схемы производства бумаги выявлено несколько сотен контуров и минимальное количество условно разрываемых потоков – 20. Это потоки с номерами: 24 (разрывает большинство циклов), 233, 238, 229, 220, 214, 199, 128, 166, 178, 2, 13, 50, 60, 68, 30, 31, 80, 81, 113. Они показаны жирными линиями на СС на рисунках 5-7. Это потоки, условный разрыв которых позволит рассчитать всю схему с минимумом итераций.

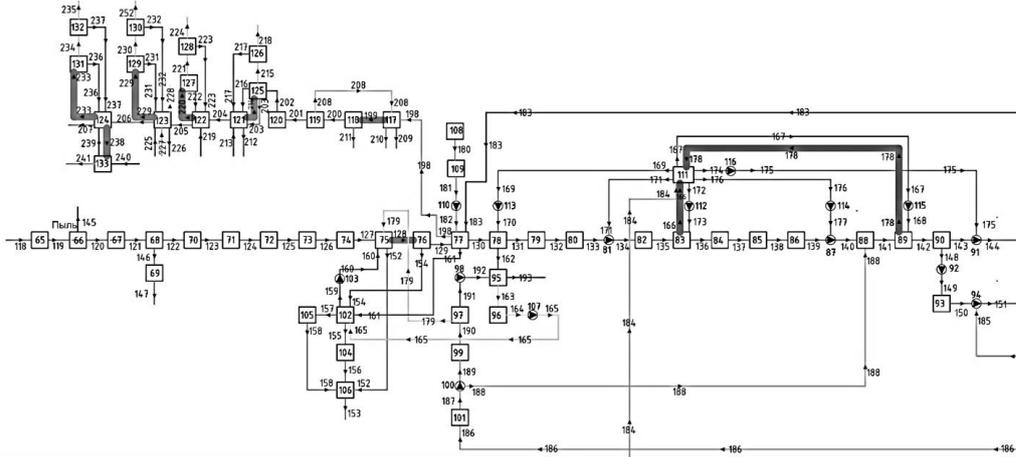


Рис.5. Структурная схема целлюлозно-бумажного производства с условно-разрываемыми потоками

Fig.5. Block diagram of pulp and paper production with conditionally breakable flows

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

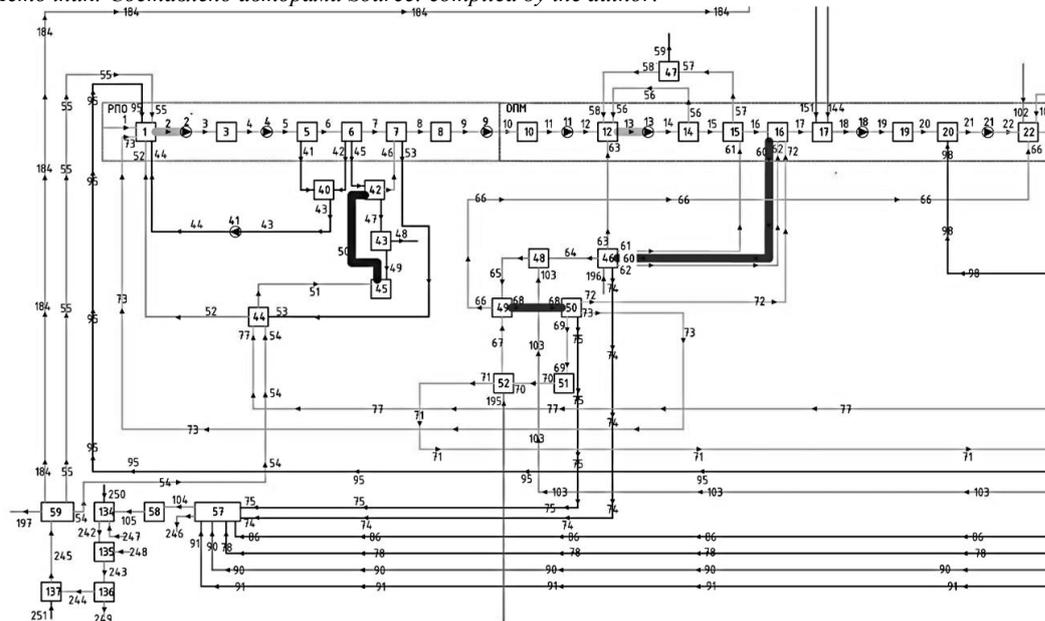


Рис.6. Структурная схема целлюлозно-бумажного производства с условно-разрываемыми потоками (продолжение)

Fig.6. Structural diagram of pulp and paper production with conditionally breakable flows (continued)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

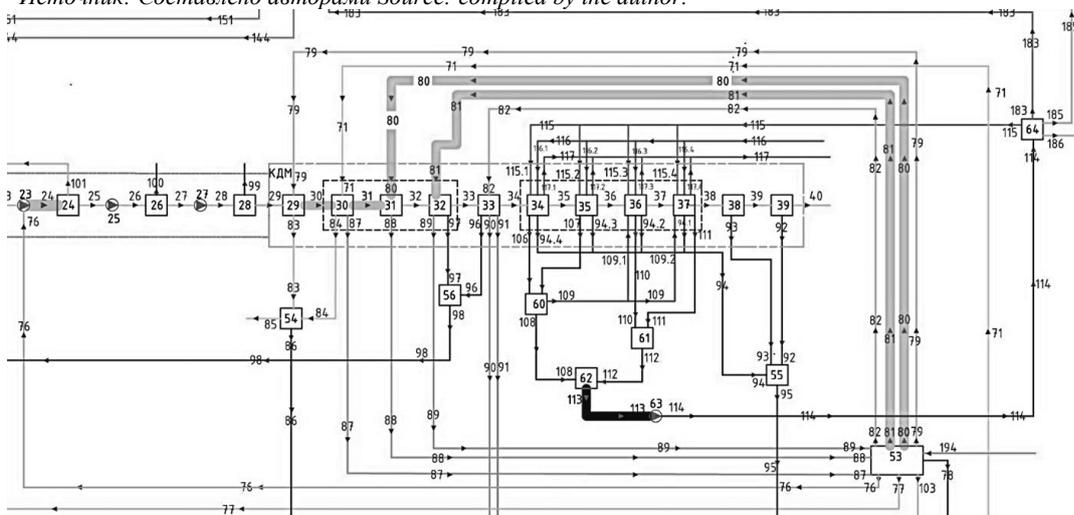


Рис.7. Структурная схема целлюлозно-бумажного производства с условно-разрываемыми потоками (продолжение)

Fig.7. Structural diagram of pulp and paper production with conditionally breakable flows (continued)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По итогам проведения структурного анализа вся структурная схема целлюлозно-бумажного производства разделена на блоки по слабым связям, то есть по связям/потокам, которые не входят в состав контуров; выделено 12 блоков – групп аппаратов. На этом иерархическом уровне проведен термодинамический анализ, составлены тепловые и эксергетические балансы каждого элемента блока, всего блока и всей теплотехнологической схемы в целом (часть схемы, а именно сушильная часть бумагоделательной машины, представлена на рисунке 1).

В таблице 1 показаны результаты расчета блока картоноделательной машины, структурная схема которого представлена на рисунке 8.

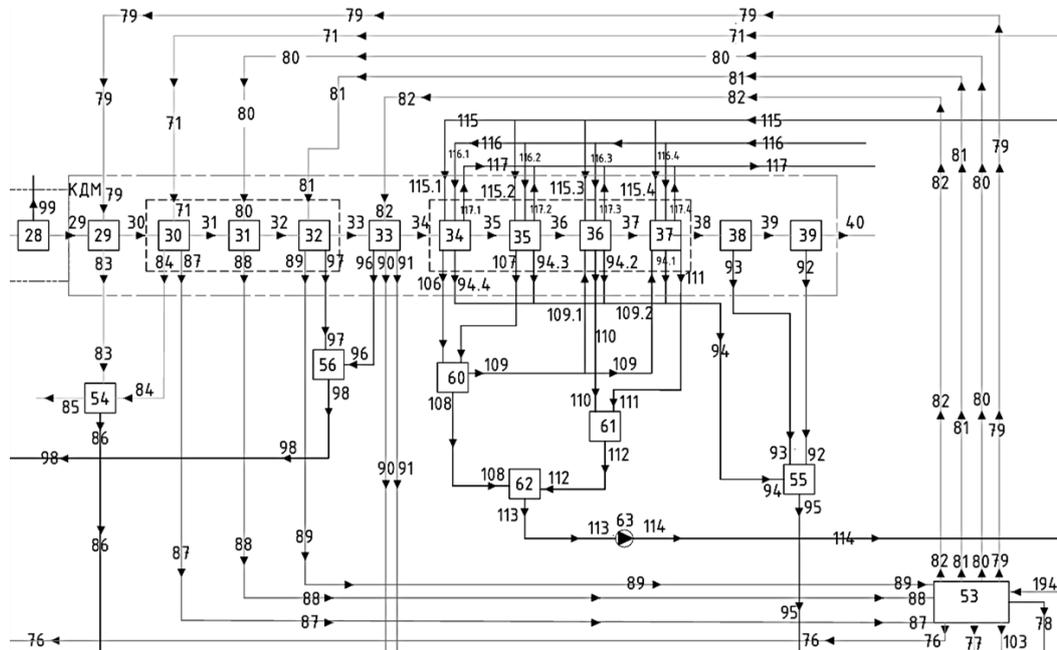


Рис. 8. Структурная схема блока бумагоделательной машины: 28 – узлоловители; 29 – напорный ящик; 30 – участок обезвоживания; 31 – отсасывающие ящики; 32 – гауч-вал; 33 – прессовая часть картоноделательной машины; 34 – 1-я группа цилиндров сушильной части картоноделательной машины; 35 – 2-я группа цилиндров; 36 – 3-я группа цилиндров; 37 – 4-я группа цилиндров; 38 – машинный каландр; 39 – резательный станок; 53 – бассейн оборотной воды; 54 – бассейн подсеточной воды; 55 – бассейн сухого брака; 56 – бассейн мокрого брака; 60 – 62 – баки для конденсата; 63 – насос

Fig.8. Structural diagram of the paper machine unit: 28 – nodules; 29 – pressure box; 30 – dewatering area; 31 – suction boxes; 32 – nut shaft; 33 – pressing part of the cardboard machine; 34 – 1st group of cylinders of the drying part of the cardboard machine; 35 – 2nd group cylinders; 36 – 3rd group of cylinders; 37 – 4th group of cylinders; 38 – a machine calender; 39 – a cutting machine; 53 – a pool of recycled water; 54 – a pool of sub-grid water; 55 – a pool of dry waste; 56 – a pool of wet waste; 60 – 62 – condensate tanks; 63 – pump

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчета для элементов, входящих в блок картоноделательной машины с указанием значений эксергетической мощности в элементах схемы, потерь эксергетической мощности, эксергетических КПД представлены в Таблице 1. Взяты только те элементы, в которых происходит изменение температуры, давления, расхода, состава потоков.

Таблица 1  
Table 1

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок картоноделательной машины  
The results of the exergetic calculation of the elements included in the block of the cardboard machine

№ потока на входе в элемент-№ потока на выходе из эл-та	Эксергия потока, кВт	Изменение эксергии потока в элементе, кВт	Потери эксергии в элементе, кВт	Эксергетический КПД, %
Напорный ящик КДМ 29				
29, 79	6132,71	149,51	149,51	97,56

Продолжение таблицы 1

30, 83		5983,2				
Участок предварительного обезвоживания 30						
30, 71		5073,28		217,95	217,95	95,7
31, 84, 87		4855,32				
Удаление воды в гауч-вале 32						
32, 81		438,29		54,57	54,57	87,54
33, 89, 97		383,72				
Обезвоживание и уплотнение в прессовой части КДМ 33						
33, 82		556,0		229,96	229,96	58,64
34, 90, 91, 96		326,04				
Сушка в 1 группе цилиндров сушильной части 34						
115.1, 116.1	106, 117	2106,06	813,39	1292,67	492,53	61,89
34	35, 94.4	105,21	905,39	800,14		
Сушка в 2 группе цилиндров сушильной части 35						
115.2, 116.2	107, 117.2	2106,06	813,39	1292,67	396,15	69,35
35	36, 94.3	216,18	1112,67	896,52		
Сушка в 3 группе цилиндров сушильной части 36						
115.3, 116.3, 109.1	110, 117.3	2282,5	1123,81	1158,69	469,47	59,48
36	37, 94.2	423,45	1112,67	689,21		
Сушка в 4 группе цилиндров сушильной части 37						
115.4, 116.4, 109.2	111, 117.4	2282,5	1675,12	607,38	322,56	46,89
37	38, 94.1	423,45	708,27	284,81		

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как следует из таблицы 1, значительные эксергетические потери присутствуют в сушильных частях картоноделательной машины, что объясняется потерями тепловой мощности в связи с выходом количества воздуха, не находящего применения в схеме. Видно, что у аппаратов 34 – 37 эксергетический КПД значительно ниже. Поэтому следует производить модернизацию именно этих аппаратов, а именно осуществить в данные аппараты возврат энергии потоков наибольшего эксергетического потенциала.

Максимально достижимый эксергетический КСИ данного блока (при расчете эксергии теплового потока), %:

$$КСИ_E = (E_{38} + E_{94} + E_{117} + E_{106} + E_{107} + E_{110} + E_{111}) \cdot 100 / (E_{34} + E_{115} + E_{116} + E_{109}) = 2225,68 \cdot 100 / 3843,21 = 57,91 \quad (4)$$

При этом действительный КСИ данного блока ниже в связи с выбросом потока горячего воздуха в окружающую среду, %:

$$КСИ_E = (E_{38} + E_{94} + E_{106} + E_{107} + E_{110} + E_{111}) \cdot 100 / (E_{34} + E_{115} + E_{116} + E_{109}) = 605,35 \cdot 100 / 3843,21 = 15,75 \quad (5)$$

Рассчитаны тепловые и эксергетические КПД всех аппаратов, блоков и всей схемы в целом. Тепловая и эксергетическая мощность всех входных и выходных потоков, а также КПД и КСИ исходной системы без утилизации ВЭР представлены в таблице 2. Как следует из Таблицы 2, а именно из низкого значения КСИ, в схеме имеется значительное количество выходных потоков с высоким потенциалом энергосбережения, но при этом сбрасываемых в окружающую среду. Так, например, тепловой КСИ можно поднять с 17,88 % до уровня КПД 81,02 % возвратом в производство всех сбрасываемых ВЭР.

С целью оценки потенциала повышения КСИ до уровня КПД проведена оценка термодинамического потенциала вторичных энергоресурсов исследуемой схемы. Для этого рассмотрены выходные потоки со значительной эксергетической мощностью в системе, то есть проведен поиск вторичных энергоресурсов и оценка потребности в энергоресурсах (табл. 3).

Результаты эксергетического расчета элементов, входящих в блок  
картоноделательной машины  
*The results of the exergetic calculation of the elements included in the block of the  
cardboard machine*

№ потока	Тепловая мощность подведенных к системе потоков $Q_1, \text{кВт}$	Эксергетическая мощность (тепловая компонента) подведенных потоков $E_{Q1}, \text{кВт}$	№ потока	Тепловая мощность отведенных от системы потоков $Q_2, \text{кВт}$	Эксергетическая мощность (тепловая компонента) отведенных потоков $E_{Q2}, \text{кВт}$
1	24,97	0,49	40	200,93	42,97
102	18,20	0,35	48	2,96	0,20
116	2866,26	733,85	59	439,17	49,81
118	259,97	5,05	85	20783,68	1749,12
194	2379,38	200,25	99	1210,86	137,33
195	87,54	7,37	100	4435,40	503,06
196	23368,29	1966,64	117	8089,98	1620,33
213	1816,19	624,72	145	6,17	0,33
219	1562,85	537,57	147	41,16	2,18
225	1754,89	603,63	153	620,00	32,80
227	0,06	0,00	193	76,90	6,47
240	1694,42	795,38	197	663,47	45,64
247	9,74	0,52	207	60,38	12,67
248	32,13	1,70	209	30,76	2,77
250	1333,16	70,53	210	6,42	0,58
251	11719,78	619,99	211	42,47	3,83
			212	214,37	57,00
			218	5,15	0,92
			224	0,05	0,01
			226	244,54	65,16
			228	3,49	0,79
			235	0,12	0,02
			241	179,82	60,44
			246	269,34	14,25
			249	656,78	34,74
			252	2,23	0,40
			253	1357,14	237,95
Итого	48927,84	6168,03	Итого	39643,73	4681,77
Потери без учета ВЭР	9284,11	1486,25			
Потери с учетом ВЭР	40178,38	5139,30			
КПД без учета потерь с ВЭР	81,02	75,90			
КСИ с учетом потерь с ВЭР	17,88	16,68			

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты расчета потенциала таких потоков представлены в Таблице 3. Это потоки воздуха 117 от сушильных установок 34, 35, 36, 37; оборотной воды 85 в бассейне

подсечной воды 54, верхнего продукта колонны 253, сточных вод 197. Определен расход получаемого энергоносителя за счет потенциала ВЭР, так как при организации системы рекуперации ВЭР важен учет потребности в расходе замещающего энергоносителя в нужном количестве.

Таблица 3  
Table 3

Результаты расчета термодинамического потенциала потоков вторичных энергетических ресурсов

*The results of calculating the thermodynamic potential of secondary energy resources flows*

№ потока	Тепловая мощность, отведенная $Q_{отв}$ , кВт	Эксергетическая мощность, отведенная $E_{отв}$ , кВт	Принимаемая в утилизационном аппарате тепловая мощность, $Q_{пол}$ , кВт	Принимаемая в утилизационном аппарате эксергетическая мощность, $E_{пол}$ , кВт	Расход получаемого энергоносителя $G_{эн}$ , кг/с	Вид используемого потока
85	20783,68	1749,12	3454,31	557,00	25,94	оборотная вода
117	8089,98	1620,33	10695,34	2589,15	28,52	теплый воздух
197	663,47	45,64	264,77	31,11	1,99	сточные воды
253	1357,14	237,95	1357,14	237,95	6,73	продукт колонн
Итого:	30894,27	3653,04	10133,38	2285,95		

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ результатов показал, что у ряда аппаратов с высокой энергоемкостью и потерями потоков в виде теплоты охлаждения, теплоты полупродуктов, теплоты отработанного воздуха, теплоты сточных вод КПД значительно ниже. Поэтому следует осуществить в данные аппараты возврат энергии сбросных потоков наибольшего эксергетического потенциала.

#### **Заключение (Conclusion)**

Разработанный алгоритм и ПО структурно-термодинамического анализа обеспечивает проведение последовательного термодинамического расчета многоэлементной теплотехнологической схемы с минимальным количеством итераций. Данный подход позволил снизить вероятность ошибки и затраты времени на получение значений термодинамических параметров системы в условиях неоднозначности исходных данных о параметрах энергоносителей, являющихся основой для последующего выбора энергосберегающей системы рекуперации вторичной энергии.

В результате вывалены потоки для включения в систему утилизации сбросной энергии для целлюлозно-бумажного производства с общей, возможной к принятию тепловой мощностью 10,13 МВт в виде теплоты охлаждения полупродуктов, теплоты отработанного воздуха, теплоты сточных вод и 2,29 МВт эксергии соответствующих потоков. Теплота полупродуктов и отработанного воздуха может найти применение в установках – источниках данной сбросной энергии, что эффективно с точки зрения минимизации потерь сбросной энергии при ее транспортировке от источника к потребителю. В связи с этим данное направление использования структурно-термодинамического анализа перспективно при расчетах многоэлементных энергоемких установок, таких как ректификационные колонны модернизированных конструкций, выпарные и сушильные установки, абсорбционные трансформаторы теплоты и т.п.

#### **Литература**

1. Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24(4):178-191. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.
2. Plotnikova L.V., Giniyatov R.R., Sitnikov S.Y., Fedorov M.A., Zaripova R.S. Perfection of the methodology for developing industrial secondary energy generation systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 288 (1). 2019. P. 012069.
3. Назмеев, Ю. Г. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности / Ю. Г. Назмеев, И. А. Коначина. – М.: Московский энергетический институт, 2001. – 364 с. – ISBN 5-7046-0698-9. – EDN XGNUVV.
4. Валиев Р.Н. Разработка системы комплексной утилизации вторичных энергоресурсов для тепловых схем дегидрирования изоамиленов в изопрен в производстве синтетического изопренового каучука СКИ-3: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2001. – 161 с.

5. Федюхин А.В., Звончевский А.Г. Перспективные направления использования теплоты низкопотенциальных источников химических производств. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24(3):15-27. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27>.
6. Степаненко М.Н., Мартынов А.В., Шелгинский А.Я. Анализ эффективности использования теплонасосных установок для утилизации теплоты вентиляционных выбросов Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 4. С. 180-188.
7. Долотовский, И. В. Алгоритмы структурнопараметрической оптимизации энергетического комплекса предприятий подготовки и транспортирования углеводородов / И. В. Долотовский, А. В. Ленькова // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 11. – С. 10-15.
8. Гарипов, Н. И. Системный анализ технологического процесса реакторного узла установки производства метанола / Н. И. Гарипов, Н. Н. Зиятдинов, И. И. Емельянов // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 8. – С. 109-115. – DOI 10.55421/1998-7072\_2024\_27\_8\_109.
9. G.M. Ostrovskii, T.V. Lapteva, N.N. Ziyatdinov, I.M. Zaitsev. Two-step problems of optimization of chemical engineering processes. Doklady Chemistry. – 2010. – Vol. 435, No. 2. – P. 343-346. – DOI 10.1134/S0012500810120086.
10. V. P. Meshalkin, T. N. Gartman, T. A. Kokhov, L. B. Korelstein. Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. Doklady Chemistry. – 2018. – Vol. 482, No. 2. – P. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.
11. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 31, iss. 14–15, pp. 2529–2540. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.018>.
12. Юшкова Е.А., Лебедев В.А., Яковлев П.В., Акманова М.С. Структурная оптимизация эксергетическим пинч-анализом. Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. № 5(95) 2020. С. 37-40.
13. Рыжова А.А., Емельянов И.И. Термодинамический анализ установки ЭЛОУ АВТ в сборнике: Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. Материалы VI Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых. 2020. С. 399-404.
14. Ноздренко Г.В., Щинников П.А. Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭС с новыми технологиями: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 190 с.
15. А.В. Волков, А.С. Маленков, А.Я. Шелгинский, Н.Е. Кутько. Эксергетический анализ системы теплоснабжения с пониженной температурой обратной сетевой воды. Надежность и безопасность энергетики. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 227-234. – DOI 10.24223/1999-5555-2018-11-3-227-234.
16. Долотовский И.В. Термодинамический анализ элементов энергетического комплекса газоперерабатывающих предприятий. Труды Академэнерго. 2017. № 3. – С. 7-22.
17. Плотникова Л.В., Торкунова Ю.В. Программное обеспечение системного анализа сложноструктурированных промышленных комплексов при разработке энергосберегающих мероприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). – С. 140-154.

#### Авторы публикации

**Плотникова Людмила Валерьяновна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, <https://orcid.org/0000-0002-7215-8152>, Email: mikhailovalv@mail.ru.

**Калинина Марина Владимировна** – ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, <https://orcid.org/0009-0006-8005-312X>, Email: esp\_mvkalinina@mail.ru.

#### References

1. Lukanin P.V., Kazakov V.G., Zverev L.O. Concept of PPI energy technology complex upgrading. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(4):178-191. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.
2. Plotnikova L.V., Giniyatov R.R., Sitnikov S.Y., Fedorov M.A., Zaripova R.S. Perfection of the methodology for developing industrial secondary energy generation systems // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 288 (1). 2019. P. 012069.

3. Nazmееv, Yu. G. Organization of energy technology complexes in the petrochemical industry. Yu. G. Nazmееv, I. A. Konakhina. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 2001. 364 p. ISBN 5-7046-0698-9. EDN XGNUVV.

4. Valiev R.N. Development of a system for the integrated utilization of secondary energy resources for thermal schemes for the dehydrogenation of isoamylenes into isoprene in the production of synthetic isoprene rubber SKI-3: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Kazan, 2001. – 161 p.

5. Fedyukhin A.V., Zvonchevsky A.G. Promising directions for the use of heat from low-potential sources of chemical production. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(3):15-27. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27>.

6. Stepanenko M.N., Martynov A.V., Shelginsky A.Ya. Analysis of the efficiency of using heat pump installations for heat recovery of ventilation emissions Reliability and safety of energy. 2021. Vol. 14. No. 4. pp. 180-188.

7. Dolotovskiy, I. V. Algorithms of structural parametric optimization of the energy complex of enterprises of preparation and transportation of hydrocarbons. I. V. Dolotovskiy, A.V. Lenkova. Automation. Modern technologies. – 2016. – No. 11. – pp. 10-15.

8. Garipov, N. I. System analysis of the technological process of the reactor unit of the methanol production plant. N. I. Garipov, N. N. Ziyatdinov, I. I. Yemelyanov. Bulletin of the Technological University. – 2024. – Vol. 27, No. 8. – pp. 109-115. – DOI 10.55421/1998-7072\_2024\_27\_8\_109.

9. G.M. Ostrovskii, T.V. Lapteva, N.N. Ziyatdinov, I.M. Zaitsev. Two-step problems of optimization of chemical engineering processes. Doklady Chemistry. – 2010. – Vol. 435, No. 2. – pp. 343-346. – DOI 10.1134/S0012500810120086.

10. V. P. Meshalkin, T. N. Gartman, T. A. Kokhov, L. B. Korelstein. Heuristic Topological Decomposition Algorithm for Optimal Energy-Resource-Efficient Routing of Complex Process Pipeline Systems. Doklady Chemistry. – 2018. – Vol. 482, No. 2. – pp. 246-250. – DOI 10.1134/S0012500818100087.

11. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant. Applied Thermal Engineering, 2011, vol. 31, iss. 14–15, pp. 2529–2540. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.018>.

12. Yushkova E.A., Lebedev V.A., Yakovlev P.V., Akmanova M.S. Structural optimization by exergetic pinch analysis // Energy conservation and energy efficiency. No. 5(95) 2020. pp. 37-40.

13. Ryzhova A.A., Emelyanov I.I. Thermodynamic analysis of elou avt installation in the collection: applied mathematics and informatics: modern research in science and technical sciences. Materials of VI International Scientific and Practical Conference (school-seminar) of young scientists. 2020. pp. 399-404.

14. Nozdrenko G.V., Shinnikov P.A. Complex exergy analysis of TPP power units with new technologies: monograph. - Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2009. – 190 p.

15. A.V. Volkov, A.S. Malenkov, A.Y. Shelginsky, N.E. Kutko. Exergetic Analysis of Heat Supply System with Reduced Return Network Water Temperature. Reliability and safety of power engineering. - 2018. – Vol. 11, № 3. – pp. 227-234. - DOI 10.24223/1999-5555-2018-11-3-227-234.

16. Dolotovskiy I.V. Thermodynamic analysis of elements of energy complex of gas processing enterprises. Trudy Akademenergo. 2017. № 3. pp. 7-22.

17. Plotnikova LV, Torkunova YuV. Software for system analysis of complexly structured industrial complexes in the development energy saving measures. Kazan state power engineering university bulletin. 2022. Vol. 14. № 1(53). pp. 140-154.

#### Authors of publication

*Ljudmila V. Plotnikova* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7215-8152>, Email: [mikhailovalv@mail.ru](mailto:mikhailovalv@mail.ru).

*Marina V. Kalinina* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. <https://orcid.org/0009-0006-8005-312X>, Email: [esp\\_mvkalinina@mail.ru](mailto:esp_mvkalinina@mail.ru).

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** 28.05.2025 г.

**Отредактировано** 01.06.2025 г.

**Принято** 14.06.2025 г.