



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЭНЕРГИЯ-2026

ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
(ТРИНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

13-15 мая 2026 г.
г. Иваново

ТОМ 3

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2026»

**ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
(ТРИНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

г. Иваново, 13 - 15 мая 2026 года

ТОМ 3

ИВАНОВО

ИГЭУ

2026

УДК 620 + 621

ББК 31

Э 45

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА // Двадцать первая всероссийская (тринадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2026»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2026. – 136 с.

ISBN 978-5-00062-728-0

ISBN 978-5-0062-725-9(Т.3)

Помещенные в сборник тезисы докладов студентов и аспирантов электроэнергетического факультета Ивановского государственного энергетического университета отражают основные направления научной деятельности кафедр в области электроэнергетики и высшего профессионального образования.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, интересующихся вопросами электроэнергетики.

Тексты тезисов представлены авторами в виде файлов, сверстаны и при необходимости сокращены. Авторская редакция сохранена, за исключением наиболее грубых ошибок оформления и правил русского языка.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель оргкомитета: Сулыненков И.Н., проректор по научной работе ИГЭУ.

Зам. председателя: Филатова Г.А., начальник управления НИРС и ТМ.

Члены научного комитета: Плетников С.Б. – декан ТЭФ; Кабанов О.А. – декан ИФФ; Мурзин А.Ю. – декан ЭЭФ; Крайнова Л.Н. – декан ЭМФ; Егорычева Е.В. – декан ИВТФ; Тарасова А.С. – декан ФЭУ.

Ответственный секретарь: Сороковнин М.Е.

Координационная группа: Вольман М.А., Мошкарина М.В., Зиновьева Е.В., Сидоров А.А., Яблоков А.А., Сороковнин М.Е.

СЕКЦИЯ 12
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Председатель – к.т.н., доцент **Кормилицын Д.Н.**

Секретарь – ст. преподаватель **Рафиков В.Р.**

*В.В. Бабочкин, студ.;
рук. А.А. Братолобов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ПЕРВИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС

Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) сохраняет свою актуальность.

При больших возмущениях, возникающих в ЭЭС, в качестве противоаварийного управления для поддержания динамической устойчивости широко применяется экстренный сброс мощности первичных двигателей агрегатов электростанции, предотвращающий их ускорение.

В частности, практикуется импульсная разгрузка турбины (ИРТ) на ТЭС или даже отключение части генераторов ГЭС.

Однако в определённых схемно-режимных условиях работы ЭЭС при возникновении больших возмущений часть агрегатов станций затормаживается, что может способствовать возникновению асинхронного режима.

В работе рассматривается эффективность противоаварийного управления, связанного с форсировкой мощности первичных двигателей на электростанциях.

На конкретном примере математического моделирования режима ЭЭС показано (см. рисунок), что экстренное увеличение мощности первичных двигателей (в рамках допустимых пределов) после отключения КЗ может увеличить предельное время его отключения $t_{откл}^{np}$ более, чем на 40%, улучшая тем самым запас устойчивости ЭЭС.

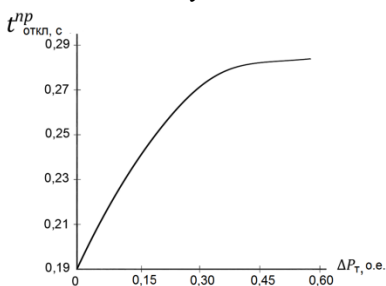


Рисунок 1. Увеличение $t_{откл.}^{np}$ в зависимости от величины наброса мощности первичных двигателей ΔP_T (о.е. по отношению к их номинальной мощности)

*А.А. Баймуратов, студ;
рук. Н.В. Серeda ст. преп.
(ДГТУ, г.Махачкала)*

ВЛИЯНИЕ РОСТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ BIG DATA ЦЕНТРОВ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Целью данной работы является разработка количественной модели, устанавливающей корреляцию между ростом вычислительных мощностей Big Data центров и динамикой их энергопотребления. Методология исследования базируется на анализе эмпирических данных за период 2018-2023 годов, собранных из открытых отчётов ведущих операторов Big Data центров.

Анализ статистических данных за период 2018-2023 годов выявил устойчивую положительную корреляцию между увеличением вычислительных мощностей и ростом энергопотребления в Big Data центрах. Разработанная модель показала высокую объясняющую способность ($R^2 = 0,87$).

Глобальное энергопотребление центров обработки данных демонстрирует устойчивую тенденцию к росту, значительно опережающую среднемировые показатели. Современные дата-центры переходят к использованию высокоплотных серверных конфигураций и специализированных процессоров для задач машинного обучения, что существенно изменяет профиль энергозатрат. Поэтому необходимо комбинированное применение аппаратных и программных решений, способных повысить энергоэффективность Big Data центров.

Проведённый эмпирический анализ подтвердил наличие экспоненциальной зависимости между увеличением вычислительных мощностей центров обработки больших данных и ростом их энергопотребления.

Оценка энергосберегающих стратегий выявила значительный потенциал комбинированного подхода, объединяющего специализированные тензорные процессоры и адаптивные алгоритмы распределения нагрузки.

Библиографический список

1. Нугаев Р.К. Управление распределенными системами обработки данных: основные проблемы и вызовы современности // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. — 2025. — №3. — С. 63–71.

2. Шульгин А.Н., Кошель И.Н., Кочуров Д.А. Стохастическая модель энергоэффективного управления вычислительной нагрузкой в многопроцессорных системах // Информатика и вычислительная техника. — 2023. — С. 185–189.

*Д.А. Биденкова, студ.;
рук. В.Р. Рафиков, ст. препод.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Синхронный генератор (СГ) является важнейшим элементом электроэнергетической системы (ЭЭС), во многом определяющим её динамическое поведение. В отечественной практике для анализа переходных процессов применяется математическая модель СГ, в основе которой лежат уравнения Парка-Горева. Рассматриваемая модель учитывает динамику движения ротора, а также переходные процессы в обмотке возбуждения и в демпферных контурах. При этом учитываются по одному эквивалентному демпферному контуру по продольной и поперечной осям (d и q , соответственно). Данная модель также известна как «трехконтурная». Вместе с тем в ряде работ с целью повышения точности моделирования переходных процессов в неявнополюсных машинах предлагается использовать «четырёхконтурную» модель СГ, учитывающую два демпферных контура по оси q [1]. Таким образом, актуальной является задача сравнительного анализа «трехконтурной» и «четырёхконтурной» моделей СГ и сопоставление результатов расчета динамической устойчивости ЭЭС с использованием различных моделей, что необходимо для формирования обоснованных выводов о практической целесообразности применения более детализированной, «четырёхконтурной», математической модели при решении инженерных задач.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ результатов расчета переходных процессов, а также результатов расчета динамической устойчивости ЭЭС в случаях применения «трехконтурной» и «четырёхконтурной» моделей СГ. В качестве показателей, используемых для количественного сопоставления результатов расчета динамической устойчивости по различным моделям, рассматриваются значения предельной длительности однофазных и трехфазных коротких замыканий (КЗ), а также значения предельной загрузки генерирующего оборудования в доаварийном режиме при трехфазных и однофазных КЗ длительностью 0,1 секунды.

Библиографический список

1. **Kundur P.** Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994.

*А.Р. Бобкова, студ.;
рук. В.Р. Рафиков, ст. препод.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Расчет динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) является важнейшей, и в то же время нетривиальной задачей электроэнергетики. Корректность параметризации математических моделей объектов ЭЭС, в частности синхронных генераторов (СГ), оказывает существенное влияние на результаты моделирования переходных процессов и оценки динамической устойчивости энергосистемы [1]. В связи с этим целесообразно оценить чувствительность показателей динамической устойчивости к вариации параметров моделей СГ для выявления наиболее влияющих параметров, погрешности которых будут в большей степени сказываться на результатах расчета динамических режимов энергосистемы.

Целью настоящего исследования является количественный анализ влияния отдельных параметров моделей СГ на результаты расчета динамической устойчивости ЭЭС. В качестве показателей, используемых для количественной оценки влияния параметров моделей СГ на выводы о динамической устойчивости, рассматриваются значения предельной длительности однофазных и трехфазных коротких замыканий (КЗ), а также значения предельной загрузки генерирующего оборудования в доаварийном режиме при трехфазных и однофазных КЗ длительностью 0,1 секунды.

В работе оценивается влияние как расчетных параметров СГ (синхронных, переходных и сверхпереходных параметров), так и параметров магнитно-связанных контуров (активных и индуктивных сопротивлений контуров статора и ротора) в каноническом представлении математической модели СГ.

Библиографический список

1. Рафиков В.Р. Исследование влияния отклонений параметров моделей синхронных генераторов на результаты расчета динамической устойчивости электроэнергетической системы / В.Р. Рафиков, И.Е. Иванов, А.Ю. Мурзин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – № 5. – С. 52–65.

*А.А. Гуля, студ.;
(АмГУ, г. Благовещенск)*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТА И РЕЛЬЕФА АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

Амурская область характеризуется резко континентальным климатом, сложным рельефом и очаговым распространением многолетне-мёрзлых грунтов. Традиционные проекты демонстрируют повышенную аварийность и технические потери. Ключевые проблемы: температурные градиенты (от -45 до $+35$ °С), гололёдно-ветровые нагрузки (толщина гололёда до 25 мм, ветер до 30 м/с), паводковые риски и сейсмичность 7–8 баллов [1]. Статистика показывает концентрацию 60 % отключений в зимне-весенний период и превышение потерь на 12–18 % [2].

Предлагаются адаптивные решения: провода с композитным сердечником АССС снижают стрелу провеса на 15–20 %; гидрофобные покрытия предотвращают перекрытие изоляции; винтовые сваи компенсируют криогенную пучинистость [3]. IoT-датчики и алгоритмы машинного обучения обеспечивают предиктивный мониторинг. Техничко-экономический анализ показывает снижение удельных затрат на передачу электроэнергии на 18–27 % при горизонте планирования свыше 15 лет [4].

Внедрение данных решений повысит коэффициент надёжности энергоснабжения удалённых населённых пунктов и промышленных объектов, что соответствует стратегии социально-экономического развития Дальнего Востока.

Библиографический список

1. Росгидромет. Климатический справочник по Амурской области. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2021. 184 с.
2. ПАО «Россети». Отчёт о деятельности за 2023 год. М. : Россети, 2024. С. 112–115.
3. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М. : Минстрой России, 2012. 32 с.
4. Смоляков А.С., Горбенко А.В., Карпов В.Е. Методика сравнительного анализа нормированной стоимости производства электроэнергии для обоснования модернизации энергосистем Дальнего Востока // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 3. С. 45–58.

С.Д. Затулков, студ.;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЭП ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

На сегодняшний день одной из ключевых задач развития электроэнергетических систем является повышение пропускной способности существующих линий электропередачи (ЛЭП) при обеспечении устойчивости их работы. Эффективным техническим решением данной проблемы является использование управляемых устройств продольной компенсации (УУПК), относящихся к устройствам FACTS. [1]

Целью работы является повышение устойчивости электроэнергетических систем, содержащих управляемые дальние линии электропередачи сверхвысокого напряжения, на основе совершенствования регулирования управляемых устройств продольной компенсации совместно с устройствами регулирования возбуждения генераторов. [2]

Объектом исследования являются электроэнергетические системы, содержащие дальние линии электропередачи сверхвысокого напряжения с устройствами управляемой продольной компенсации и автоматическими регуляторами возбуждения генераторов электрических станций. [2]

В процессе работы использовались методы, базирующиеся на теории электрических цепей, фундаментальных положениях теории электромагнитных и электромеханических переходных процессов, теории автоматического регулирования, а также на расчетных методах исследования, математическом и имитационном моделировании. [2]

В результате исследования впервые было показано, что тип области устойчивости не влияет на диапазон допустимых значений коэффициента регулирования устройства продольной компенсации, принадлежащего оси действительных чисел. [2]

Библиографический список

1. **Об утверждении** Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года / распоряжение правительство Российской Федерации от 12 апреля 2025 года № 908-р
2. **Голов В.П.**, Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Управляемая продольная компенсация линий сверхвысокого напряжения / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2017. – 84 с.

*А.О. Капанина-Гамина, студ., А.Р. Тычкин, асп.;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЭС НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛА НАГРУЗКИ

Развитие энергетического комплекса (ЭК) открывает возможность интеграций различных видов электрических станций в особенности, позволяющих компенсировать пиковый режим нагрузки, создаваемый потребителем электрические энергии.

В соответствии с планом развития российского ЭК и Энергетической стратегией РФ до 2050 года утверждено увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в ЭК РФ [1]. Однако, это может привести к сложностям регулирования напряжения и частоты в узлах нагрузки из-за стохастичности генерации такими источниками.

Интеграция ВИЭ в изолированные системы и энергосистемы (ЭС) со слабыми связями ведет к уменьшению эквивалентной инерции, что существенно осложняет процессы регулирования частоты. Замещение традиционных синхронных машин безынерционными инверторными установками приводит к росту скорости изменения частоты (ROCOF) и увеличению амплитуды её отклонений при возникновении дефицита мощности. Параллельно с этим, требования к работе силовой электроники, такие как характеристика HVRT (High Voltage Ride Through), накладывают ограничения на поведение преобразователей и напрямую влияют на качество регулирования напряжения и частоты в сети. Для комплексного анализа устойчивости узлов нагрузки в подобных системах часто применяются методы оценки квазиустановившихся режимов с использованием статистических моделей и статических характеристик потребления мощности.

Было проведено исследование с использованием программно-аппаратного комплекса «Real-Time Digital Simulation». Смоделирован участок электроэнергетической системы (ЭЭС), состоящий из эквивалентной ЭС, понижающего трансформатора 220/35 кВ и ВЭС (IV-типа). Были проведены опыты с утяжелением режима, в ходе которых получены статические характеристики узла нагрузки.

Работа посвящена анализу особенностей моделирования ЭС с ВЭС и измерению статической характеристики узла нагрузки и регулирования частоты ЭС в зависимости от режима работы станции.

Библиографический список

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 12.04.2025 № 908-р.

В.В. Клюбанов, студ.;
рук. В.А. Орехов, к.т.н., доц.
филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ЭНЕРГОДЕФИЦИТА

Одной из ключевых проблем современной электроэнергетики России является неравномерность генерации и потребления, усугубляемая энергодефицитом в ряде регионов. Системы накопления электроэнергии (СНЭ) рассматриваются как эффективный инструмент решения этой проблемы, позволяющий сглаживать пики нагрузки, повышать надёжность электроснабжения и интегрировать возобновляемые источники энергии (ВИЭ) в энергосистему. Цель работы — анализ перспектив применения СНЭ в Единой энергетической системе России.

В 2025–2026 гг. произошёл качественный сдвиг в развитии СНЭ: осенью 2025 г. принят федеральный закон, впервые закрепивший понятие «система накопления энергии». Минэнерго разработало проект постановления о проведении конкурентных отборов мощности СНЭ на территориях с энергодефицитом, что создаёт нормативную основу для масштабного внедрения технологии.

Практическая реализация началась с пилотного проекта ПАО «Россети» в ОЭС Юга, где планируется строительство накопителей суммарной мощностью 350 МВт с ёмкостью 6 часов. Параллельно рассматривается установка СНЭ на Дальнем Востоке мощностью до 390 МВт.

Новизна предлагаемого подхода заключается в комплексном анализе технико-экономических аспектов внедрения СНЭ с учётом российских реалий. Показано, что окупаемость проектов достигается за счёт индексации тарифа на передачу электроэнергии в течение пяти лет.

Перспективы исследования связаны с разработкой методики оптимального размещения СНЭ в распределительных сетях и интеграцией накопителей с объектами ВИЭ-генерации.

Библиографический список

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. 9-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2021. 472 с. //Опадчий Ф.Ю. Перспективы развития систем накопления энергии в ЕЭС России // Энергетическая политика. 2026. № 3. С. 12–18.

*П.А. Логинов, студ.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц., Н.А. Родин, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ВНУТРЕННИХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

В настоящее время программные комплексы для расчёта токов короткого замыкания (КЗ) не позволяют провести оценку токов при внутренних повреждениях кабельных линий (КЛ). Определение параметров схем замещения (СЗ) КЛ для моделирования внутреннего повреждения способствует уточнению величин токов КЗ при проектных расчётах, совершенствованию подходов к определению удельных параметров кабельной линии и развитию алгоритмов РЗА. Предметом исследования являются продольные параметры СЗ кабелей напряжением 110-500 кВ при повреждениях изоляции «жила-экран». Целью работы является определение параметров СЗ для моделирования внешнего однофазного КЗ и пробоя изоляции между жилой и экраном одной из фаз.

На основе разработанного ранее алгоритма [1] в ПВК «PSCAD» определены продольные параметры СЗ КЛ из опытов внешнего однофазного КЗ и пробоя изоляции, параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Продольные параметров СЗ КЛ

Класс напряже- ния	Значения удельных параметров, Ом/км, для опытов:							
	однофазное КЗ				замыкание «жила-экран»			
	R_1	X_1	R_0	X_0	R_1	X_1	R_0	X_0
500 кВ	0,014	0,25	0,204	1,616	0,022	0,075	0,022	0,053
220 кВ	0,025	0,224	0,19	1,686	0,042	0,086	0,042	0,066
110 кВ	0,095	0,262	0,25	1,695	0,246	0,040	0,246	0,039

Параметры КЛ 500 кВ, соответствующие опыту внешнего КЗ, верифицированы путем сравнения с паспортными значениями. Параметры, соответствующие замыканию «жила-экран», верифицированы по величинам токов КЗ в ПВК «PSCAD» и «APU РЗА».

Сделан вывод, что при пробое изоляции индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности значительно снижаются по сравнению с внешним однофазным повреждением.

Библиографический список

1. **Определение** продольных параметров прямой и нулевой последовательностей кабельной линии из схем замещения из опыта пробоя изоляции между жилой и экраном / П.А. Логинов, А.Ю. Мурзин, Н.А. Родин // Энергоинновации: Материалы Научно-практической конференции Молодежной секции РНК СИГРЭ, Иваново, 27 ноября 2025 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2025. – С. 106-109.

Д.А. Лысов, студ.;
рук. И.Е. Иванов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВАРИЙНЫХ ОСЦИЛЛОГРАММ

Классический подход к определению параметров схем замещения (ПСЗ) воздушных линий электропередачи (ЛЭП) базируется на определённых допущениях, что может приводить к ошибкам вычисления ПСЗ [1]. В последние 10–15 лет опубликован большой массив исследований, посвящённых идентификации ПСЗ ЛЭП на базе синхронизированных векторных измерений (СВИ) [1, 2 и др.]. Подавляющее большинство работ сконцентрировано исключительно на определении ПСЗ прямой последовательности ЛЭП. Вместе с тем интерес представляет также оценка ПСЗ нулевой последовательности, которая потенциально осуществима только в режиме с резко выраженной несимметрией на ЛЭП, например, при внутреннем или близком внешнем коротком замыкании (КЗ). Кроме того, применение устройств СВИ на воздушных ЛЭП ограничено, в основном, сетями сверхвысокого напряжения. В связи с этим целесообразно, наряду с данными СВИ, рассмотреть возможность использования аварийных осциллограмм, фиксируемых регистраторами аварийных событий и цифровыми устройствами релейной защиты.

Целью исследования является разработка и тестирование математических моделей для оценки продольных сопротивлений схем замещения прямой и нулевой последовательностей воздушных ЛЭП в резко несимметричных режимах, вызванных КЗ, с использованием аварийных осциллограмм. На первом этапе исследования разработана и верифицирована модель для идентификации реактивных ПСЗ прямой и нулевой последовательностей при внутреннем КЗ на ЛЭП.

Библиографический список

1. V. Milojević, S. Čalija, G. Rietveld, M.V. Ačanski and D. Colangelo, Utilization of PMU Measurements for Three-Phase Line Parameter Estimation in Power Systems, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 67, no. 10, pp. 2453-2462, Oct. 2018, doi: 10.1109/TIM.2018.2843098.
2. H. Goklani, G. Gajjar and S.A. Soman, A robust method for transmission line sequence parameter estimation using synchronized phasor measurements, in Electric Power Systems Research 223 (2023) 1–7, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109616>.

Л.Е. Муранская, асп.;
рук. В.А. Шакиров, к.т.н, доц.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С РАЗМЕЩЕНИЕМ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА И RUPSA

В условиях роста доли распределенной генерации, возобновляемых источников энергии задача оптимального планирования конфигурации распределительных сетей приобретает особую актуальность. Наличие множества вариантов размещения генерирующих мощностей и трассировки сетей делает задачу сложной и многокритериальной.

Цель исследования – разработка методики оптимального планирования конфигурации сети с одновременным выбором источников генерации (ТЭЦ, ветряные электростанции (ВЭС), дизельные электростанции (ДЭС)) и мест их установки. Реализована двухуровневая модель на языке Python: на первом уровне генетический алгоритм осуществляет поиск оптимальной топологии сети, на втором - средствами RUPSA выполняется расчет режимов и оценка экономических показателей. Такое разделение обусловлено высокой размерностью задачи.

На тестовой сети (8 узлов, 7 линий) получены варианты оптимальных конфигураций с различными типами генерации (ТЭЦ, ВЭС, ДЭС). Оптимизация выполнена по экономическому критерию (минимизация приведенных затрат и LCOE) с последующей верификацией технических параметров: уровня напряжения в узлах и потерь мощности в линиях.



Рисунок 1. Схема оптимальной конфигурации сети

Результаты подтверждают эффективность применения генетического алгоритма в сочетании с RUPSA для задач долгосрочного планирования распределительных сетей.

А.А. Недвига, О.С. Суханова, асп.;
Рук. Д.Н. Кормилицын, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМ УСТРОЙСТВОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ «MATLAB/SIMULINK» С ЦЕЛЬЮ ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В современной электроэнергетике применение управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) экономически выгоднее с точки зрения повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), чем строительство дополнительных линий [1].

Однако при расчете режимов в программных комплексах возникает проблема верификации полученных результатов. Целью данной работы является разработка имитационной модели электроэнергетической системы с установленным на ВЛЭП УУПК. Разработка модели реализована в программной среде «MATLAB/Simulink». Блок-схема модели представлена на рисунке 1.

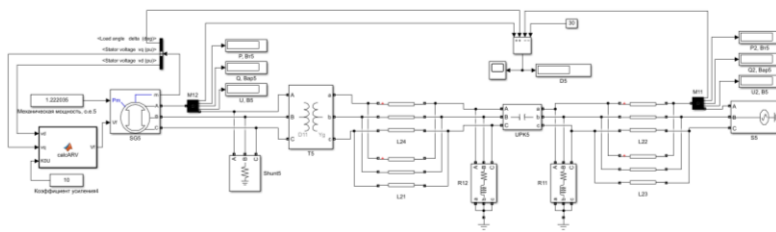


Рисунок 1. Имитационная модель исследуемой ЭЭС

Выявлены особенности моделирования установившихся режимов (УР) в программной среде «MATLAB/Simulink». Проведен сравнительный анализ результатов расчета УР, полученных при точном и приближенном приведении к основной ступени напряжения.

Библиографический список

1. Кошечев Л.А., Шлайфштейн В.А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети // Электрические станции. – №12. – 2005. – (23) выпуск 3, 2007. – С. 30 – 38.

*А.А.Рожин, студ.;
рук. Ю.Д. Кутумов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В настоящее время АО «СО ЕЭС» активно разрабатываются методические указания по расчёту (выбору) параметров настройки устройств противоаварийной автоматики. Среди указанных устройств есть те, в которых уставки и объёмы управляющих воздействий рассчитываются на основе максимально допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях (различные функции автоматики предотвращения нарушения устойчивости).

Величина нерегулярных колебаний определяется с использованием расчётных выражений, полученных путём статистической обработки перетоков активной мощности в «слабых связях» в 1960-е гг. Тем не менее, в настоящее время на большей части Единой энергетической системы России связи и сечения не являются не «слабыми», ни полными. Кроме этого, изменились возможности АО «Со ЕЭС» по измерению перетоков активной мощности в режиме реального времени, а причины возникновения нерегулярных колебаний могли качественно и количественно измениться с течением времени.

Указанное определяет актуальность цели работы, которая заключается в статистической обработке результатов измерения величины нерегулярных колебаний и разработке предложений по их определению в ходе производственной деятельности сотрудников Системного оператора.

Дана количественная оценка величине отношения нерегулярных колебаний и текущему перетоку активной мощности в контролируемом сечении. Обозначена зависимость статистических характеристик нерегулярных колебаний от частоты измерения перетока активной мощности.

Перспективным направлением в вопросе определения нерегулярных колебаний является определение их величины не как функции нагрузки в какой-то части энергосистемы, а как функции квадратного корня текущей величины перетока, для чего требуется исследование вопроса в масштабах всей страны.

*Д.М. Рябенкова, студ.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г.Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПРОДОЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ФАЗНОМ КООРДИНАТНОМ БАЗИСЕ

В настоящее время повышаются требования к точности расчётов установившихся электроэнергетических режимов и определения токов КЗ в целях выбора электросетевого оборудования, обеспечения эффективности функционирования устройств релейной защиты (особенно выполненных на микропроцессорной элементной базе) и др.

При расчётах электрических величин нормальных и аварийных режимов электроэнергетических систем в электрических сетях 110 кВ и выше необходимо учитывать наличие электротехнических устройств, предназначенных для продольного или продольно-поперечного регулирования напряжения, например, автотрансформатор или двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения, в нейтраль которых включается вольтодобавочный трансформатор (ВДТ). Вопросам моделирования указанных электротехнических комплексов уделено множество научно-технических работ. Как правило, в указанных публикациях рассматриваются модели, созданные с использованием метода симметричных составляющих, не позволяющих учитывать несимметрию токов и напряжений по фазам в различных нормальных и аварийных режимах.

Целями и задачами исследования являются:

– разработка моделей автотрансформатора и ВДТ в фазном координатном базисе с учётом возможного различия сопротивлений фазных обмоток на сторонах высшего, среднего и низшего напряжений автотрансформатора (собранный из однофазных), наличия регулирования коэффициентов трансформации и, вследствие этого, изменения значений сопротивлений обмоток автотрансформатора и ВДТ;

– тестирование полученных моделей в нормальных и аварийных режимах и использованием специализированного программного комплекса «Облачный сервис «Лаборатория РЗА».

*М.Ю. Рядкова, студ.;
рук. Д.Н. Кормилицын, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЕ С УПРАВЛЯЕМЫМ УСТРОЙСТВОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

В современной электроэнергетике значительное внимание уделяется повышению пропускной способности воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) без сооружения новых линий. Одним из действенных способов решения этой задачи является применение управляемых устройств продольной компенсации (УУПК), которые обеспечивают возможность изменения параметров линии и регулирования режимов работы энергосистемы.

При применении УУПК важную роль играет не только распределение напряжений, но и распределение углов напряжения вдоль линии, так как именно угловые характеристики определяют передачу активной мощности и устойчивость работы энергосистемы.

Цель данной работы заключается в исследовании распределения углов напряжения в электроэнергетической системе, включающей генератор, трансформатор, две линии электропередачи, реакторы и управляемое устройство продольной компенсации. Математическая модель системы реализована на языке C++ с использованием среды Microsoft Visual Studio.

В рамках исследования выполнен расчет установившихся режимов при различных значениях угла ротора генератора. Определены углы напряжения в узлах схемы и получены зависимости их распределения вдоль линии в зависимости от режима работы системы.

Библиографический список

1. Кошечев Л.А., Шлайфштейн В.А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети // Электрические станции. – №12. – 2005. – С. 30–38.
2. Голов В.П., Мартыросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Моделирование режимов электроэнергетических систем с управляемыми элементами. – Иваново, 2016.

Э.А. Смирнов, студ.;
рук. И.Е. Иванов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗНЫХ КООРДИНАТ

Анализ динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) является важной практической задачей, качество решения которой во многом определяется корректностью математических моделей элементов ЭЭС, а также возможностью реализации сложных видов несимметрии, например, регламентируемых методическими указаниями по устойчивости ЭЭС. Применение фазного координатного базиса, в отличие от однолинейных моделей, не накладывает существенных ограничений на количество и характер точек несимметрии в ЭЭС.

Целью работы является создание и тестирование комплексной имитационной модели с пофазным представлением элементов ЭЭС и оценкой динамической устойчивости при различных возмущающих воздействиях. На первом этапе работы сформированы модели отдельных элементов ЭЭС, автоматизирована сборка матрицы узловых проводимостей, верифицирован расчёт установившегося режима. На текущей стадии исследования в расчётную модель интегрирован алгоритм решения уравнения движения ротора синхронной машины. Полученные результаты для «простейшей» ЭЭС тождественны соответствующим данным из «MATLAB/Simulink» (рисунок 1). В дальнейшем предполагается развитие разработанной модели для многомашинной ЭЭС.

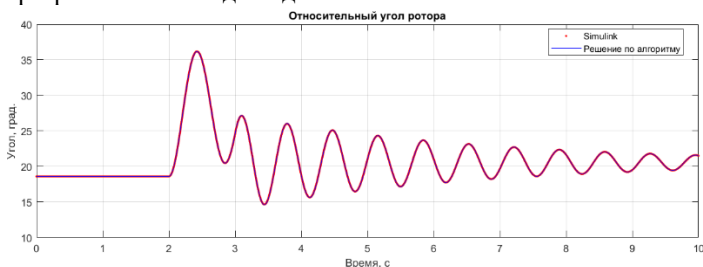


Рисунок 1. Расчётные кривые изменения относительного угла ротора синхронного генератора, полученные в «MATLAB/Simulink» и по разработанному алгоритму

*С. Д. Соловьев, студ.;
рук. О. А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РЕЖИМНЫЕ ХРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 220 КВ

Актуальной задачей в области электроэнергетики является создание интеллектуальных электроэнергетических систем, основой которых могут быть компактные управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии электропередачи (УСВЛ), осуществляющие изменение собственных эквивалентных параметров и режимных характеристик [1].

Целью работы является сравнительный анализ режимных характеристик компактной УСВЛ с воздушной ЛЭП традиционной конструкции.

Создана информационная модель УСВЛ 220 кВ, одним из ключевых факторов которой является способ задания параметров ЛЭП, влияющих на точность расчетов установившихся режимов электроэнергетических систем с учетом конструкции опоры и марки провода.

Отличительной особенностью УСВЛ является попарное сближение фаз для разных цепей, которое приводит к значительному увеличению их электромагнитного влияния, а регулирование угла сдвига между системами векторов напряжений и токов цепей обеспечивает изменение в большом диапазоне эквивалентных параметров и основных характеристик линии: волнового сопротивления, натуральной и зарядной мощностей.

Выполнены расчёты основных режимных показателей и предельных перетоков мощности двухцепной УСВЛ 220 кВ в программном комплексе «EnergyCS Режим» с учетом влияния фазового сдвига систем напряжений цепей на их значения.

Установлено, что предельно допустимые перетоки мощности УСВЛ значительно выше по сравнению с ВЛ 220 кВ традиционного типа.

Полученные результаты могут быть использованы в проектных организациях и энергосистемах.

Библиографический список

1. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М. Управляемые компактные линии электропередачи высокого напряжения // Проблемы региональной энергетики. — 2016. — №1 (30).

*К.А. Торопов, студ.;
рук. А.И. Кулешов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУНКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время в сетях 6-10 кВ осуществляется централизованное регулирование напряжения, однако основным недостатком этого способа является невозможность обеспечения требуемых уровней напряжения в соответствии с ГОСТ32144-2013, для всех потребителей в связи с сильной неравномерностью графиков нагрузок. Одним из основных способов решения этой проблемы регулирования напряжения является установка пунктов автоматического регулирования напряжения (далее – ПАРН). Для определения места установки ПАРН и исследования его поведения возникает вопрос моделирования его работы в программных комплексах расчетов установившихся режимов.

Целью работы является моделирование влияния ПАРН на уровень напряжения в сети 6 кВ.

На первом этапе исследования были рассмотрены задачи, решаемые при помощи ПАРН, его функции, конструкция и принцип действия. Основным элементом конструкции ПАРН являются вольтдобавочные трансформаторы. Принцип действия ПАРН аналогичен принципу действия линейного регулировочного трансформатора с автоматическим выбором ступени регулирования [1].

На втором этапе было произведено моделирование ПАРН в программном комплексе «СИМЭС». В результате исследования были построены эпюры напряжения для режимов максимальных и минимальных нагрузок и определены места установки ПАРН.

Библиографический список

1. **Перинский, Т.В.** Опыт применения пунктов автоматического регулирования напряжения ПАРН серии ВДТ/VR-32 в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Т.В. Перинский, А.В. Крылов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012 – №1 – С. 42-48.

*В.Б. Убодоева, студ.;
рук. В.А. Шакиров, к.т.н., доц.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДГОТОВКА ДАННЫХ О ТЕХНИЧЕСКОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ВЕТРОВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

При оценке технического потенциала ветровой и солнечной энергии необходимы почасовые данные о скорости ветра и солнечной радиации, получаемые с метеостанций и открытых баз данных, например, RP5 и PVGIS, соответственно. Эти данные могут иметь пропуски, аномалии, что требует их обработки [1-3].

В среде PyCharm IDE (Python) с помощью библиотек tkinter, pandas, numpy, matplotlib, openpyxl, xlrd разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом, автоматизирующее обработку данных для последующего их использования.

Для анализа ветроэнергетического потенциала программа использует файл, формируемый на сайте rp5.ru [2]. Данные в файле имеют обратную хронологическую последовательность, периодичность от 3 до 6 часов, могут иметь длительные пропуски. Методом линейной интерполяции формируется массив данных часового разрешения, выполняется сортировка по времени, а затем расчёт генерации ветроэнергетической установки с получением значений удельной выработки на 1 кВт установленной мощности.

Для анализа генерации фотоэлектрическими преобразователями данные загружаются с сайта PVGIS [3]. Из файла удаляется служебная информация, проводится анализ аномальных значений и расчет выработки энергии к 1 кВт установленной мощности.

Программа позволяет рассчитывать статистические показатели, строить профили генерации энергии, экспортировать данные в удобном для пользователя формате. Разработанная программа может применяться в предпроектных исследованиях, при разработке имитационных и оптимизационных моделей энергокомплексов, в образовательном процессе.

Библиографический список

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. – СПб.: изд-во Политехнического университета, 2016. – 245 с.
2. Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 12.03.2026).
3. PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System [Электронный ресурс]. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. (дата обращения 12.03.2026).

Е.И. Шишова, студ.;
рук. И.Е. Иванов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС НА БАЗЕ ТРЕХФАЗНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Обеспечение динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) является сложной и важной практической задачей. Типовые отечественные программные комплексы (в частности, применяемые в рамках учебного проектирования «Mustang» и «RastrWin3/RUSTab») оперируют однолинейными схемами замещения ЭЭС, в рамках которых достаточно сложно выполнить оценку устойчивости ЭЭС при продольно-поперечной несимметрии, в частности, регламентируемой указаниями [1]. Средства моделирования, предоставляющие библиотеки трехфазных моделей элементов ЭЭС, позволяют снять соответствующие ограничения. Одним из таких средств является программный комплекс «MATLAB/Simulink», преимуществом которого является также относительно простая автоматизация процесса для многократного запуска модели на расчет с различными параметрами.

Отмеченные обстоятельства определяют *цель настоящей работы*, связанную с автоматизированным анализом влияния отдельных факторов на выводы о динамической устойчивости ЭЭС, содержащей крупную электростанцию, дальнюю электропередачу 750 кВ и приёмную энергосистему. В работе [2] выполнено исследование влияния моделей синхронных машин на расчётные значения предельного времени существования короткого замыкания. В настоящей работе анализу подлежит, главным образом, влияние схемно-режимной ситуации, зависящей от параметров «внешней», по отношению к синхронным машинам, схемы ЭЭС. Результаты получены с применением имитационного моделирования в «MATLAB/Simulink».

Библиографический список

1. **Методические указания по устойчивости энергосистем.** Утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 г. № 630. – Москва, 2018.
2. **Калашникова А.В.** Исследование влияния моделей синхронного генератора в задаче анализа динамической устойчивости электроэнергетической системы / А.В. Калашникова, И.Е. Иванов // *Электроэнергетика: Девятая всероссийская (девятнадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Материалы конференции.* В 6-ти томах, Иваново, 2025. – С. 14.

М.В. Яковлев, студ.;
рук. А.А. Братолобов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И СХЕМАХ ЭЭС НА ОЦЕНКУ ЕЕ УСТОЙЧИВОСТИ

В настоящее время повышение доли нестабильной генерации (ВИЭ) и сложного электрооборудования в энергосистемах увеличивает требования к точности оценки их динамической устойчивости. Существующие модели синхронных генераторов (от простых до детализированных, учитывающих демпферные контуры, насыщение и пр.) и схем замещения электроэнергетических систем (ЭЭС) разной степени детализации по-разному реагируют на неизбежную вариацию исходных данных (параметров оборудования, режимных условий, структуры сети).

Целью работы является количественная оценка влияния вариации исходных данных и выбора математической модели синхронного генератора и схемы ЭЭС на результаты расчёта динамической устойчивости.

Объектом исследования является электроэнергетическая система (или её узловый фрагмент), включающая синхронные генераторы.

Проведенный анализ показал, что неучет вариации исходных данных и некорректный выбор модели могут привести к существенным погрешностям в прогнозе устойчивости, а следовательно, к рискам принятия неоптимальных решений по управлению и развитию энергосистем [1].

По результатам анализа получены зависимости ключевых показателей динамической устойчивости (критическое время снятия КЗ, запас устойчивости по мощности, характер переходных процессов) от выбора модели синхронного генератора, детализации схемы замещения ЭЭС и вариации исходных данных [2].

Результаты работы будут использованы в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 г. № 630. – Москва, 2018.
2. **Учебное** пособие. «Применение ЭВМ в учебных расчетах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем». – Братолобов А.А., Огорельшев Н. А., Аржанникова А. Е., 2001 – 108 с.

СЕКЦИЯ 13
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Председатель – к.т.н., доцент Бушуева О.А.

Секретарь – ассистент Титов В.А.

*Е.М. Абрамов, студ.;
рук. О.А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Производство электроэнергии и тепла вблизи потребителя – это проблема, которая с каждым годом набирает всё большую актуальность. Объекты малой (распределенной) энергетики снижают зависимость от крупных генерирующих станций, что особенно важно в случае аварий или ремонтных работ в сетях. Ключевыми преимуществами таких источников являются их эффективность, экологичность и экономичность [1].

Цель работы исследовать принципы функционирования, особенности интеграции и эффективность применения систем электроснабжения с распределенной генерацией (РГ). Идея этой работы состоит в переходе от централизованной модели к децентрализованной, с множеством источников меньшей мощности.

Установлено, что основные типы источников РГ: газопоршневые и газотурбинные установки, солнечные электростанции (крышные и наземные), ветрогенераторы, малые ГЭС, мини ТЭЦ [2].

Выявлена интеграция объектов малой генерации в распределительные сети выявляет ряд проблем, требующих индивидуального подхода.

По результатам исследования внедрение малой генерации меняет характер распределительных сетей, наделяя их чертами сетей высшего напряжения. Это порождает проблему устойчивости, связанную с режимами работы генераторов и рисками аварий.

Направлением дальнейшего исследования станет моделирование рабочих режимов конкретной электрической сети с источником малой генерации.

Библиографический список

1. **Онлайн** платформа Академия «Распределенная генерация». Направления развития // Энергоэксперт. - 2016. - №3.
2. **Автономные** системы электроснабжения на базе возобновляемых источников электроэнергии. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-tendentsii-v-oblasti-postroeniya-avtonomnyh-sistem-elektrosnabzheniya-s-ispolzovaniem-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii/viewer>

Д.А. Барнакова, студ.;
Рук. В.А. Шакиров, к.т.н., доц.
(ИРНИТУ, г. Ижевск)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ СИНТЕЗА ПРОФИЛЕЙ НАГРУЗКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Исследование режимов работы распределительных электрических сетей (РЭС) часто затруднено отсутствием достоверных почасовых данных о нагрузках трансформаторных подстанций (ТП).

Для создания правдоподобных профилей нагрузки разработана программа, реализующая генерацию почасовых профилей активной, реактивной и полной мощности для разнородных типов потребителей. Имитационная модель позволяет выбрать количество ТП, тип потребителя, задать индивидуальные параметры для каждой ТП с учетом предустановленных значений детерминированных закономерностей и стохастических компонент – гауссовского шума и вероятности аномалий.

Апробация проведена на примере генерации годового профиля нагрузки для ТП, питающей жилых потребителей. График демонстрирует зимние пики, связанные с отоплением и освещением, а также повышенные значения в летний период, обусловленные кондиционированием помещений (рис. 1). Суточные колебания проявляются в виде регулярных вечерних максимумов. Полученный профиль воспроизводит ожидаемые суточные и сезонные паттерны, подтверждая адекватность модели.

Программа предназначена для тестирования алгоритмов прогнозирования, расчета потерь и моделирования режимов РЭС.

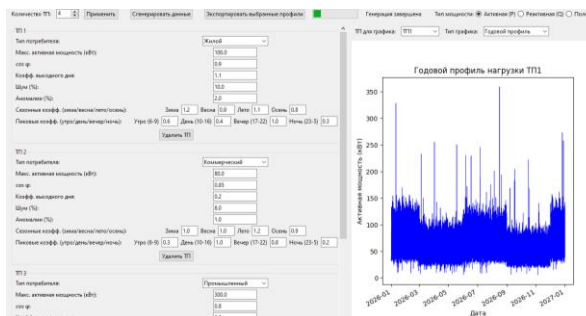


Рисунок 1. Годовой профиль активной мощности для ТП, питающей жилых потребителей

*Е.С. Бахирева, студ.;
рук. Д.А. Полкошников, ст. преп., Д.Н. Кормилицын, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Известно, что выявление неисправностей асинхронных двигателей (АД) на ранних стадиях проявления позволяет экономить потребляемую электроэнергию и снижать финансовые потери, связанные с недовыработкой продукции [1, 2].

Для проведения достоверного и своевременного диагностирования АД разработан программно-технический комплекс (ПТК), который состоит из устройства для записи сигналов тока статора и внешнего магнитного поля АД (рис. 1), а также программы для обработки записанных сигналов (рис. 2).



Рисунок 1. Внешний вид устройства для записи сигналов

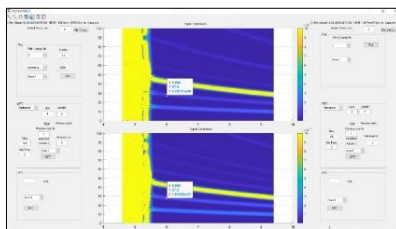


Рисунок 2. Программа для обработки сигналов

Разработанный ПТК позволяет производить диагностирование АД в установившемся режиме, а также режимах пуска и выбега, анализируя данные, полученные с токовых цепей и из внешнего магнитного поля АД, что повышает достоверность диагностирования.

Библиографический список

- 1. Повышение** энергоэффективности системы электроснабжения промышленных предприятий / Бахирева Е.С., Полкошников Д.А., Кормилицын Д.Н. // Девятнадцатая всероссийская (двенадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2025»: материалы конференции. Т. 3. – ИГЭУ, 2025. — С. 27-27.
- 2. Анализ** потерь в высоковольтных электродвигателях собственных нужд электростанций при повреждении обмоток роторов / А.С. Страхов, А.Н. Морозов, Д.А. Полкошников, А.А. Скоробогатов // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения): материалы конференции. Т. 1. – ИГЭУ, 2021. – С. 107.

*С.П. Борисов, студ.;
рук. Ю.П. Юренков, к.т.н., доц.
(УлГТУ, г. Ульяновск)*

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ПЛАВКОЙ ВСТАВКИ НА ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЙ ЭФФЕКТ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

С развитием электрических сетей городов растут токи короткого замыкания (КЗ). Ограничение их термического и электродинамического воздействия - необходимая задача при проектировании. Для этого могут использоваться плавкие предохранители, свойства которых напрямую зависят от конструкции и формы сечения плавкой вставки.

Форма сечения задает параметры нагрева, времени плавления и место разрушения элемента. В предохранителях ПР-2 вставка имеет 1-4 сужения, в ПН-2 - медная лента толщиной 0,1-0,2 мм разделена на параллельные проводники [1].

Круглое сечение проволочных вставок даёт минимальное отношение периметра к площади сечения, снижает плотность тока и требует увеличения числа параллельных элементов. Ленточная форма при равной площади поперечного сечения имеет большую поверхность теплообмена и ускоренный разогрев при КЗ. Это сокращает время плавления, способствует раннему возникновению дуги, ограничивающей пиковые значения тока. У ленточной вставки отношение площади поверхности к объёму в 2 раза выше, а постоянная времени нагрева сокращается почти вдвое, и вставка перегорает на 30% раньше по фазе тока КЗ.

Анализ показал, что ленточные вставки с сужениями и перфорацией обеспечивают более выраженный токоограничивающий эффект, по сравнению с вставками круглого сечения, что важно для модернизации существующих и разработки новых конструкций.

Существуют спиральные вставки - плавкий элемент навит вокруг державки большого сопротивления, обладает регулируемой инерционностью. При перегрузке державка перегорает и переключает ток на спираль, обеспечивая надежное отключение.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением составных и профилированных вставок, новых материалов. Например, ведётся разработка жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей, плавкой вставкой которых является ртуть.

Библиографический список

1. **Чукреев Ю.Я.** Электрическая аппаратура. – Сыктывкар: Сыктывкарский лесной институт (филиал СПбГЛТА им. С.М. Кирова), 2006. – 37 с.

*Л.К. Демидкина, студ.;
рук. С.А. Амелин, к.т.н., доц.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП С ЛИНЕЙНЫМИ ДРАЙВЕРАМИ

В настоящее время в качестве бытовых осветительных приборов чаще всего используются светодиодные лампы, пришедшие на замену лампам накаливания. Причиной этому стала более высокая энергоэффективность. Однако в отличие от ламп накаливания, светодиодные лампы являются нелинейной нагрузкой – форма потребляемого тока сильно отличается от синусоидальной. В связи с этим в спектральном составе тока появляются гармонические составляющие с частотами, сильно превышающими 50 Гц. Эти высшие гармоники оказывают негативное влияние на работу электросети, вызывая дополнительные потери. Помимо роста потерь возрастает действующее значение тока через нулевой провод. Это может привести к «отгоранию нуля» – разрушению нулевого провода, вызванному перегрузкой по току.

Чтобы исправить ситуацию используются корректоры коэффициента мощности, но их применение в бытовых светодиодных лампах не целесообразно из-за их дороговизны. Поэтому используются светодиодные лампы с повышенным коэффициентом мощности. Самыми распространенными на данный момент являются лампы с классическим линейным драйвером, наиболее перспективными – лампы с секционированным драйвером. Целью работы являлось создание имитационных моделей двух типов драйверов в программе Micro-Cap 12 для исследования и сравнения их коэффициентов мощности.

Проведенное моделирование и спектральный анализ [1] позволили убедиться, что классические линейные драйверы имеют высокий коэффициент мощности – 0,9, а у секционированных драйверов этот показатель и вовсе достигает 0,97. Исследования показали, что лампы с секционированным драйвером создают меньше высших гармоник в потребляемом токе, что уменьшает негативное влияние на энергосеть. Им не нужен дорогостоящий корректор коэффициента мощности. По этим причинам такие драйвера имеют большие перспективы для использования.

Библиографический список

1. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 : учебное пособие для вузов / М.А. Амелина, С.А. Амелин. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 632 с. — ISBN 978-5-8114-6995-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/153923> (дата обращения: 29.01.2026).

П.Д. Кутейников, асп.;
рук. А.Н. Шилин, д.т.н., проф.
(ВолгГТУ, г. Волгоград)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ РЕЛЕ ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

Современное состояние электроэнергетической системы Российской Федерации характеризуется недостаточной эксплуатационной надежностью, следствием чего выступает высокий уровень отказов оборудования, проявляющийся в систематических авариях (короткие замыкания, перегрузки) и технологических нарушениях. В качестве одного из наиболее действенных инструментов локализации коротких замыканий и предотвращения перегрузок выступают комплексы релейной защиты и автоматики (РЗА), включая специализированные устройства контроля частоты и напряжения, которые в наши дни не в полной мере соответствуют современным требованиям к чувствительности, быстродействию и помехоустойчивости.

Для решения сформулированной проблемы предложено использовать устройство, предложенное авторами [1].

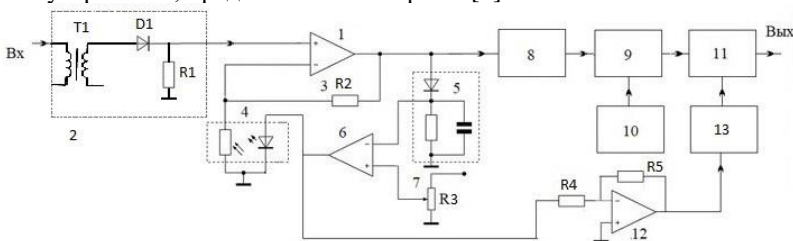


Рисунок 1. Схема реле частоты и минимального напряжения

Функционирование разработанного устройства базируется на применении компенсационного метода частотных измерений. В отличие от традиционных подходов, прямое измерение напряжения в схеме реализовано без промежуточных преобразований, что обеспечивает минимизацию инструментальной погрешности.

Библиографический список

1. Шилин А.Н., Дикарев П.В., Кутейников П.Д., Власов В.М. Адаптивный преобразователь частоты сети для релейной защиты систем электроснабжения // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 6. С.

*Р.А. Мальцев, студ., В.А. Титов асп.;
рук.: А.Ф. Сорокин, к.т.н., доц., А.А. Яблоков, к.т.н., доц
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОДНОТИПНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В условиях динамичного развития электроэнергетических систем прогнозирование электрических нагрузок становится ключевым инструментом для обеспечения надёжности, экономичности и качества электроснабжения. Важным инструментом для прогнозирования нагрузки является анализ графиков потребления электроэнергии [1].

Нагрузка и ее изменения отличаются в зависимости от типа потребителя, времени суток, погоды и других факторов. Если же выделить группу потребителей, то можно получить разные закономерности поведения этих нагрузок. Сложность представляет то, что неравномерность распределения существует даже при описании одного и того же потребителя.

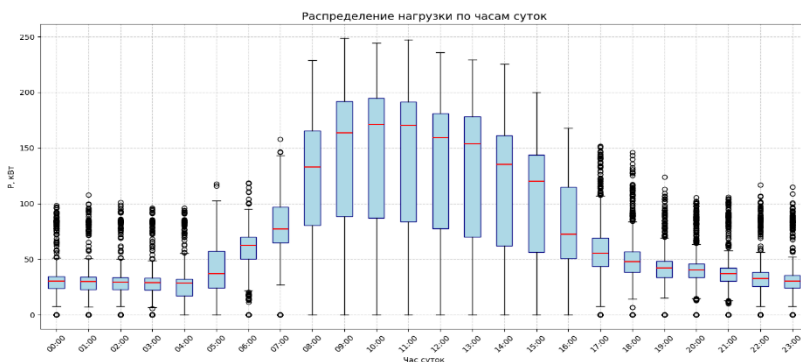


Рисунок 1. Распределение нагрузки по часам суток

На рисунке 1 представлено распределение нагрузки каждый час для промышленного предприятия. Несмотря на то, что описывается один и тот же потребитель, наблюдается разброс в нагрузке вплоть до 230 кВт. Решение проблемы предсказания неоднородности распределения нагрузки в рамках даже одного потребителя – одна из основных задач при создании единого метода прогнозирования электрических нагрузок.

Библиографический список

1. **Farrok O., Ahmed A., Mifta Z., et al.** A state-of-the-art comparative review of load forecasting methods: Characteristics, perspectives, and applications // *Energy Conversion and Management*: X. — 2025. — Vol. 26. — P. 100922. — DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.100922.

*С.В. Нуякшева, студ.; Я.И. Петухов, асп.;
рук. И.А. Липужин, к.т.н., доц.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород)*

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВАНАДИЕВОГО ПРОТОЧНОГО АККУМУЛЯТОРА

В работе представлена математическая модель ванадиевого проточного аккумулятора (ВПА) с учётом взаимного влияния электрохимических, электрических и гидродинамических параметров на режимы работы системы. Модель состоит из трех блоков:

- определения напряжения;
- определения уровня заряда;
- модели насосов.

Напряжение холостого хода ВПА зависит от температуры и уровня заряда батареи (SOC):

$$E_{xx} = n \cdot \left\{ E_{\text{яч}} + \frac{2RT}{F} \ln \frac{SOC}{1 - SOC} \right\}, \quad (1)$$

где n – количество ячеек в ВПА; R – универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/(моль·К)); T – температура окружающей среды (К); F – постоянная Фарадея (9,65 · 10⁴ Кл/моль); $U_{\text{яч}} = 1,4$ В – потенциал одной ячейки при заряде в 50%.

Уровень заряда ВПА в момент времени ($t + \Delta t$) зависит от заряда в предыдущий момент времени (t) и режима работы (заряд/разряд):

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) \pm I \cdot U \cdot \frac{\Delta t}{P_{\text{ном}} \cdot t_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где I – ток ВПА; U – напряжение ВПА; Δt – шаг расчета; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность; $t_{\text{ном}}$ – номинальное время заряда/разряда.

Для прокачки электролита в ВПА применяются насосы, поэтому расход электролита (Q) является одним из важных параметров:

$$Q = \frac{I}{N \cdot SOC}, \quad (3)$$

где N – емкость электролита.

Разрабатываемая модель необходима для исследования факторов, влияющих на режимы работы ванадиевого проточного аккумулятора. Для верификации модели планируется сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными об эксплуатации реальных ВПА в составе систем накопления электроэнергии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01603, <https://rscf.ru/project/25-29-01603/>

*Я.И. Петухов, асп.; Е.В. Крюков, к.т.н., доц.;
рук. А.А. Лоскутов, д.т.н., доц.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород)*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ АЛГОРИТМАМИ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНЕРЦИИ

Современный этап развития мировой электроэнергетики характеризуется фундаментальной структурной трансформацией, связанной с масштабной интеграцией распределенной генерации (РГ) в системы электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий (ПП). Внедрение объектов РГ позволяет повысить эффективность электроснабжения, снизить нагрузку на централизованные сети и снизить потери при передаче электроэнергии.

Успешная реализация преимуществ РГ требует разработки эффективных алгоритмов управления силовыми преобразователями, способных обеспечить синхронизацию с единой энергосистемой, а также адаптацию к изменяющимся нагрузкам и внешним возмущениям. Особое значение приобретает учет динамических характеристик объектов РГ, которые не обладают инерционностью по сравнению с традиционными синхронными генераторами.

В мировом научном сообществе уже проводились исследования по данной проблеме и были предложены алгоритмы управления виртуальной инерции (ВИ), основным преимуществом которых является инерционный отклик. Особую актуальность исследование приобретает в контексте специфики промышленного электропотребления, характеризующегося наличием мощных нелинейных, резкопеременных и двигательных нагрузок. Однако, большинство предлагаемых алгоритмов ВИ базируется на идеализированных моделях нагрузки и не учитывают реальные условия функционирования СЭС ПП. Поэтому необходимо повысить эффективность управления ВИ за счет адаптации к реальным нагрузкам СЭС ПП.

Разработана имитационная модель СЭС ПП с источником РГ и системой ВИ. По результатам моделирования подтверждена высокая эффективность систем ВИ для демпфирования колебаний. Установлено, что ВИ обеспечивает сопоставимую с традиционными генераторами динамическую устойчивость СЭС ПП.

В дальнейшем планируется оценить эффективность и границы применимости систем ВИ в условиях динамического характера нагрузки, характерного для ПП. Это критически важно для повышения динамической устойчивости и надежности энергоснабжения энергоемких ПП в реальных условиях эксплуатации.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2025-0001).

Н.В. Пименова, асп.;
рук. В.А. Шакиров, к.т.н., доц.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫБОРА КОНФИГУРАЦИИ ГИБРИДНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

Электроснабжение удалённых территорий, не подключённых к централизованным сетям, сопряжено с высокими затратами на доставку топлива и эксплуатацию дизельных электростанций. Для снижения себестоимости электроэнергии внедряются гибридные энергокомплексы, которые используют возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и аккумуляторные батареи. Выбор состава оборудования и мощности представляет собой сложную многовариантную задачу. Предложена имитационная модель на языке Python, позволяющая подбирать оптимальный состав гибридного энергокомплекса, включающего фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), ветроэнергетические установки (ВЭУ), дизель-генераторы и аккумуляторную батарею.

Модель выполняет почасовой баланс мощности, учитывает ограничения по запасу энергии в аккумуляторах и рассчитывает ключевые показатели: недоотпуск электроэнергии, расход топлива, нормированную стоимость энергии (LCOE). Исходные данные – профили нагрузки, нормализованная генерация ВИЭ [1], технико-экономические параметры оборудования.

Апробация модели выполнена на примере поселка Усть-Соболевка, расположенного в Приморском крае. В настоящее время электроснабжение осуществляется от ДЭС мощностью 516 кВт.

Для условий Усть-Соболевки выполнено сравнение двух вариантов. При работе только ДЭС расчётный LCOE составил 0,21 \$/кВт·ч. Для гибридного комплекса с ФЭП 300 кВт, ВЭУ 50 кВт и аккумуляторами 150 кВт·ч значение LCOE снизилось до 0,17 \$/кВт·ч. Недоотпуск электроэнергии отсутствует. Предложенная модель позволяет исследовать эффективность различных конфигураций гибридных энергокомплексов для удалённых населённых пунктов.

Библиографический список

1. PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System [Электронный ресурс]. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. (дата обращения 12.03.2026).

*М. А. Полушкин, студ.;
рук. О.А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РАЙОНА ГОРОДА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

В настоящее время распределенная генерация (РГ) приобретает всё большую актуальность в связи с дефицитом мощности, износом электрических сетей и необходимостью повышения надежности электроснабжения потребителей [1].

При внедрении объектов РГ в электрические сети одной из первоочередных задач является выявление особенностей электрических параметров в различных режимах работы сети с источником малой генерации (ИМГ).

Объектом исследования является электрическая сеть города с новым районом нагрузок и суммарной мощностью 15 МВт.

Проблема энергодефицита района решена путем сооружения ИМГ (мини-ТЭЦ с установкой шести генераторов мощностью 1750 кВт каждый с напряжением 10,5 кВ), который имеет связь с существующей подстанцией энергосистемы, выполненную кабелями 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и протяженностью 4,43 км.

Целью работы является выполнение расчетов режимов электрической сети района города с ИМГ и анализ допустимости режимных параметров с учетом ограничений со стороны энергосистемы на границе балансовой принадлежности.

Создана информационная модель электрической сети для расчетов различных режимов работы мини-ТЭЦ (параллельно с энергосистемой, автономно и др.).

Проведен анализ режимных параметров при различных нагрузках и количествах работающих генераторов на мини-ТЭЦ.

Выявлены особенности каждого режима и обоснована допустимость подключения мини-ТЭЦ к существующей подстанции энергосистемы на параллельную работу.

Библиографический список

1. **Энергетическая стратегия России на период до 2035 года** [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: <https://www.npkks.ru/fileadmin/f/documents/energ-strat-2035.pdf> (дата обращения: 09.04.2026).

*В.А. Соколов, студ.;
рук. Д.П. Андрианов к.т.н., доц.,
(ВлГУ, г. Владимир)*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Тепловой режим работы электроаппаратуры в существенной мере влияет на ее надежность и долговечность, а также на эксплуатационные потери мощности при функционировании электрических сетей.

Компенсация реактивной мощности в электросети за счет установок батарей конденсаторов сопровождается выделением тепла. Реактивная мощность для конденсатора определяется как

$$Q = U \cdot I = U^2 \cdot \omega \cdot C,$$

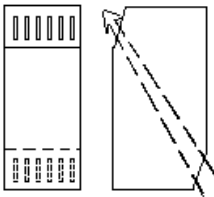
где U и I – напряжение и сила тока в сети,

$\omega \cdot C$ – эквивалент омического сопротивления конденсатора,

ω – круговая частота колебаний электрического тока,

C – емкость конденсатора.

Конструктивные мероприятия, направленные на обеспечение приемлемых условий эксплуатации конденсаторов реактивной мощности [1] не полностью учитывают особенности процессов теплообмена, в частности, возможности естественной конвекции [2].



Доработка конструкции шкафа электрооборудования заключается в применении наклонных плоскостей с прорезями в верхней части дверцы и нижней части стенки шкафа (Рис. 1). Стрелкой показано направление конвективного потока воздуха.

Рисунок 1. Схема решения

Модернизация конструкции шкафа электрооборудования дает возможность интенсифицировать естественную конвекцию тепловых потоков, омывающих батареи конденсаторов (электроаппаратуру), находящихся внутри шкафа.

Библиографический список

1. <https://www.aukrm.ru/blog/optimalnyy-rabochiy-rezhim-kondensatornykh-ustanovok-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti/?ysclid=mny9e9k6gq86625423>
2. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. – СПб: НИУ ИТМО, 2012.

*А.С. Сухачев, студ.;
рук. О.А. Бушueva, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛА НАПРЯЖЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРЕДПРИЯТИЯ С НЕПРЕРЫВНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Случайные кратковременные провалы напряжения в питающих электрических сетях предприятий с непрерывным технологическим процессом негативно влияют на работу основного электрооборудования и приводят к значительным финансовым потерям, которые складываются из следующих составляющих: упущенная прибыль из-за проста оборудования и потери времени на возобновление технологического цикла, ремонт вышедшего из строя оборудования, потери сырья [1].

Целью работы является анализ причины возникновения провала напряжения в питающей электрической сети 110 кВ Уфимского нефтеперерабатывающего завода (УНПЗ) и оценка его влияния на работу основных технологических установок.

Проведен анализ аварийной энергетической ситуации в Башкирской энергосистеме, происшедшей 2 июля 2016 г., и установлены причины провала напряжения на линиях электропередачи 110 кВ на границе балансовой принадлежности УНПЗ и энергосистемы.

Проведен анализ схемы электроснабжения УНПЗ от источников питания (110 кВ) до технологических установок (10 кВ и 0,4 кВ), которые участвовали в технологическом процессе 2 июля 2016 г. и в отношении которых предприятием был произведен расчет убытка от нарушения электроснабжения.

Была выявлена структура электрооборудования каждой установки, а также точки их присоединения в схеме электроснабжения предприятия.

Библиографический список

1. **Ершов С.В.**, Жабин Б.А. Анализ влияния провалов напряжения на показатели работы систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020.

*К.Е. Тимошин, студ.;
рук. О.А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАГРУЗОК ПОТРЕБИТЕЛЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Объектом исследования является система электроснабжения города, включающая подстанции ПС-220/110 кВ, ПС-110/10 кВ, к которым подключены экспериментальные установки научно-исследовательского института в области ускорительной техники, влияющие на качество электроэнергии в питающей сети.

Основными нелинейными и резкопеременными нагрузками являются: ускоритель У-70 (цикл ~10 с, мощность до 65 МВт), установка «Бустер» (до 10 МВт) и установка ПРГК-100 (до 2,5 МВт).

Проведен анализ режимов работы энергетического оборудования по результатам измерений инструментальными цифровыми приборами. Анализировались значения напряжений и токов на шинах 220, 110 и 10 кВ подстанций, в линиях электропередачи, а также токов и напряжений в цепях преобразовательных агрегатов.

Проведены расчеты показателей качества электроэнергии (ПКЭ) по несинусоидальности напряжения и колебаниям напряжения в питающей электрической сети в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [1].

Выполнена оценка влияния каждой нелинейной нагрузки на питающую электрическую сеть по анализу допустимости ПКЭ. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих на шинах 10 кВ ПС У-70 составило 20,5 % (предельно допустимое значение – 8 %), на ПС 220/110 кВ зафиксированы средние значения 1,98 – 2,09 % при норме 2 % для сетей 110 кВ. Длительная доза фликера колебаний напряжения на шинах 10 кВ ПС-220/10 кВ из-за совместной работы НИИ и стороннего потребителя в некоторые интервалы времени могут превышать нормативные значения этого показателя.

Библиографический список

1. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.

*Д.Р. Титков, студ.;
рук. А.Е. Аржанникова, (к.т.н., доц.)
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ 20 КВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

На сегодняшний день повышение энергоэффективности городских электрических сетей является одной из приоритетных задач в электроэнергетике. Мегалополисы характеризуются высоким уровнем энергопотребления, значительной плотностью электрических нагрузок и повышенными требованиями к надежности электроснабжения потребителей. Техническое состояние оборудования и кабельных линий в сетях 6-10 кВ имеет значительный физический и моральный износ, пропускная способность их исчерпана [1]. В крупных городах растут потери мощности и напряжения в линиях при передаче электроэнергии. Эти обстоятельства потребовали принять решение о переходе на класс напряжения 20 кВ, что является стратегическим направлением развития электрических сетей среднего напряжения.

Проведен анализ источников и выявлено, что пропускная способность ЛЭП 20 кВ составляет 7,5 Мвт, что в 3 раза выше, чем у ЛЭП 6(10) кВ. Допустимая дальность передачи – 8 км. Падение напряжения меньше на порядок в 10(4) раз. Установлено, что в сети потребуются меньшее количество понижающих подстанций, сократится число перегрузок и поломок оборудования, аварийных отключений, что приведет к улучшению надёжности электроснабжения [1].

Выявлено, что с начала 21 века в Москве введены 1000 км кабельных линий класса напряжения 20 кВ. а также 20 кВ используется в Казани и в Екатеринбурге. В Ханты-Мансийском автономном округе напряжение 20 кВ используется для электроснабжения потребителей, удаленных на значительные расстояния. Подобные сети используются во Франции, Германии, Японии, Болгарии, Чехии, Словакии.

Библиографический список

1. **Применение** напряжения класса 20 кВ в системах электроснабжения современных мегаполисов. [Электронный ресурс]: URL:
2. <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/642> (дата обращения 27.10.2025)

В.А. Титов асп.;
рук.: А.А. Яблоков, к.т.н., доц
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ «ЦИФРОВОГО ОТПЕЧАТКА ПОТРЕБИТЕЛЯ» ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Графики электрической нагрузки потребителей имеют различную форму и характер изменения в виду различных особенностей потребителей, погодных условий, календарного расписания и прочих факторов. В свою очередь суточные графики нагрузки даже в рамках одного потребителя могут значительно меняться в различные дни в году. Использование типовых графиков нагрузок может значительно снизить точность результатов в задачах расчета установившихся режимов, оценки состояния и определения потерь в распределительных сетях. При этом существует проблема выбора типового графика, поскольку не всегда известно, какой график нагрузки будет наиболее точно описывать реальное потребление электроэнергии. В связи с этим актуальной является задача разработки нового принципа организации выбора графика нагрузки в условиях неопределенности данных, с учетом изменяющихся графиков нагрузок отдельно взятого потребителя и требования универсальности подхода для возможности использования в реальном секторе экономики.

В докладе будет представлен принцип формирования «цифрового отпечатка потребителя», который направлен на определение подходящего графика нагрузки потребителя и дальнейшего использования данного принципа для разработки универсальной модели машинного обучения краткосрочного прогнозирования нагрузки. Был составлен набор данных, которые располагаются в многомерном пространстве и имеют разные размерности (совмещены данные в векторном формате и скалярные). Возможность гибкого формирования «цифрового отпечатка потребителя» основана на применении метода масок, который позволяет передавать не все данные по определенному потребителю, но при этом не ограничивает в передаче полного набора данных по другим потребителям. Реализован программный код, позволяющий автоматически рассчитывать параметры для многомерного пространства. Проверка работоспособности разработанного метода показала высокую эффективность описанного подхода для определения типа потребителя по данным «цифрового отпечатка потребителя».

*М.Р. Филиппов, студ.;
рук. И.А. Липужин, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Нижний Новгород)*

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Низкотемпературные водородные топливные элементы (ТЭ) – электрохимические источники тока, преобразующие химическую энергию водорода в электрическую без процесса горения. Для создания мощных энергоустановок ТЭ объединяют в модули. Эффективность энергоустановки во многом зависит от правильного выбора системы управления.

В [1] описана имитационная модель энергоустановки на основе двух батарей водородных ТЭ, разрабатываемая в *Matlab Simulink*. Энергоустановка построена по активной топологии, когда каждый ТЭ подключен к шине постоянного тока через индивидуальный понижающий преобразователь постоянного тока (DC/DC). Первый преобразователь работает в режиме поддержания постоянного напряжения на ШПТ. Второй в режиме поддержания постоянного тока, а для управления используется значение мощности, требуемой нагрузкой от второго ТЭ.

На рисунке 1 приведен график изменения мощности энергоустановки с учетом нагрузочных и условно-постоянных потерь при ступенчатом изменении нагрузки с шагом 200 Вт.

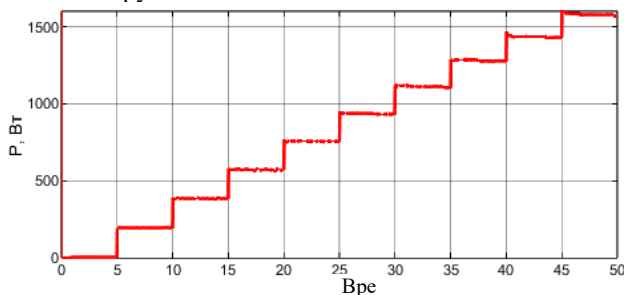


Рисунок 1. График мощности энергоустановки при ступенчатом изменении нагрузки

Библиографический список

1. И.А. Липужин, М.Р. Филиппов. Разработка имитационной модели энергоустановки на основе водородных топливных элементов // Будущее технической науки. – Н. Новгород: НГТУ, 2026.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2025-0001).

*А.Г. Шафигуллина, мл. специалист
(ООО «Алабуга Девелопмент», г.Елабуга)*

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В современной энергетике энергосбережение представляет собой одну из ключевых и наиболее насущных задач. Исходя из изучения имеющихся сведений, была разработана Таблица 1 [1]. В ней обобщены данные об эффективности внедрения различных энергосберегающих технологий.

Таблица 2. Эффективность внедрения энергосберегающих технологий

Показатель	До внедрения, %	После внедрения, %
Удельные потери энергии	18	8
Энергозатраты на единицу продукции	100	75
Общая экономия энергоресурсов	-	15-25

Для эффективного управления энергопотреблением используются интеллектуальные системы автоматического управления. Функционирование данных систем базируется на постоянном отслеживании потребления энергии и глубоком анализе собранной информации для определения направлений оптимизации энергоэффективности.

Согласно статистическим данным, осветительные системы являются одним из энергоемкими на промышленных предприятиях. В связи с этим, многие компании активно занимаются модернизацией освещения. Это включает в себя замену устаревших светильников на более эффективные светодиодные аналоги и внедрение автоматизированных систем управления освещением [2]. Применение таких систем позволяет значительно повысить энергоэффективность и снизить затраты на электроэнергию до 40%.

Библиографический список

1. **Вестник** Брянской ГСХА. 2025 № 4 (110) ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В РОССИИ ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия
2. **Байнева И. И.**, Байнев В. В. Аспекты разработки энергоэффективных светотехнических изделий для решения задач повышения энергосбережения // **Вестник МГУ**. 2014. №1-2.

СЕКЦИЯ 14

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Председатель – к.т.н., доцент **Гусенков А.В.**

Секретарь – ассистент **Вихарев Д.Ю.**

*Р.Д. Айсин, студ.;
рук. Д.Ю. Вихарев, ассист.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА С ПОМОЩЬЮ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РЕТОМ-25

Снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) является неотъемлемой частью технического обслуживания трансформаторов тока (ТТ). ВАХ представляет собой зависимость напряжения одной из обмоток от намагничивающего тока со стороны этой же или другой обмотки при холостом ходе ТТ.

Синусоида напряжения U_2 , при снятии ВАХ в области насыщения, всегда искажается, поэтому следует использовать мощный источник напряжения для снятия характеристики.

В экспериментах использовался источник №3 в РЕТОМ-25, который имеет два диапазона: 220В, 4А и 50В, 20А. Диапазоны реализованы с помощью ответвлений выходного трансформатора и имеют разное внутреннее сопротивление. Диапазон с наибольшим внутренним сопротивлением будет провоцировать большее искажение ВАХ при ее снятии. На рис. 1 показаны ВАХ, полученные в ходе экспериментов.

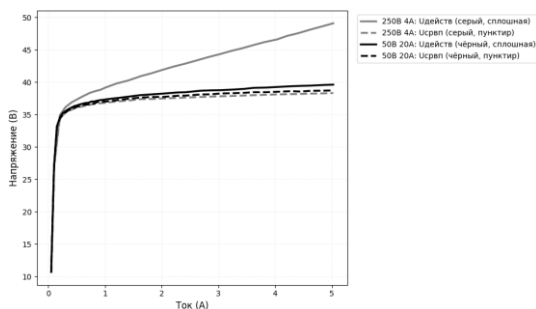


Рисунок 1. ВАХ ТТ при различных диапазонах источника РЕТОМ-25 и измерительных приборов, реагирующих на разные значения напряжения

Проанализировав рис.1, обнаружен существенный разброс ВАХ при использовании вольтметров, реагирующих на действующее значение, при различных диапазонах. Однако, можно заметить, что при использовании приборов, реагирующих на средневыпрямленное значение, ВАХ практически не изменилась.

*Р.Д. Айсин, студ.;
рук. Н.А. Родин, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СХЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭНЕРГОБЛОКА № 1 КУРСКОЙ АЭС-2

В работе объектами являются электрическая схема и электротехническое оборудование собственных нужд блока № 1 Курской АЭС-2.

Цель работы – разработка и анализ расчетной модели схемы собственных нужд блока № 1 Курской АЭС-2.

В работе решен комплекс задач, направленных на сбор информации об электротехническом оборудовании, установленном на объекте исследования, режимах работы участка электрической сети и изучение характерных режимов работы электродвигателей напряжением 6 кВ в различных схемно-режимных ситуациях.

Разработка расчётной модели схемы собственных нужд энергоблока № 1 Курской АЭС-2 с учётом фактического состава оборудования, параметров питающих сетей и источников, положения коммутационных аппаратов и режимов заземления нейтралей произведена в Облачном сервисе «Лаборатория РЗА».

На основе разработанной модели выполнены расчётные эксперименты по определению токов и напряжений в заданных режимах работы схемы (нормальный, ненормальный, аварийный).

Произведена оценка ударных токов, периодической и аperiodической составляющих тока КЗ с целью расчета электродинамического и термического действия на электрическое оборудование в схеме собственных нужд [1].

Выполнена оценка пусковых токов электродвигателей и распределения напряжений в сети в пусковых режимах.

Произведена верификация, полученных результатов расчётов параметров в заданных режимах работы схемы.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52736-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта электродинамического и термического действия тока короткого замыкания». - М.: Стандартинформ, 2009. - 37 с.

*К.С.Алёшин, асп.; Н.В.Кузьмина, ст. преп.;
рук. В.А.Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И КРИТЕРИИ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЦИФРОВЫХ ТОКОВЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАЩИТАХ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Современные исполнения цифровых токовых защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью, как правило, используют лишь один параметр, характеризующий ток нулевой последовательности $3I_0$, который можно назвать основным, – действующее значение тока промышленной частоты $3I_{0(50)}$. Такой подход ограничивает техническое совершенство (селективность и чувствительность) токовых защит от ОЗЗ и область их возможного применения.

Важную информацию о характере замыкания и поврежденном присоединении могут нести также другие параметры, дополнительно характеризующие измеряемые токи $3I_0$ и обеспечивающие расширение информационной базы защиты ОЗЗ. Такой подход к выполнению защиты от ОЗЗ получил название многопараметрического.

Наиболее важными задачами, решаемыми на основе многопараметрического подхода, являются распознавание устойчивых и дуговых ОЗЗ, опасных и не представляющих особой опасности для защищаемой сети разновидностей дуговых замыканий, косвенный контроль дуговых перенапряжений в сети, выбор наиболее эффективного способа действия защиты и др. (таблица).

Таблица 1 – Дополнительные параметры во многопараметрических токовых защитах

Дополнительный параметр	Критерий измерения	Область (задачи) применения
Относительный уровень ВГ в токе $3I_{0(ВГ)*} = 3I_{0(ВГ)}/3I_{0(50)}$	$3I_{0(ВГ)*} < K$	Распознавание устойчивых ОЗЗ
	$3I_{0(ВГ)*} > K$	Распознавание дуговых ОЗЗ
Относительный уровень ВГ в токе $3I_{0(ВГ)*}$ и длительность интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги в переходном режиме ОЗЗ	$3I_{0(ВГ)*} > K$ $\Delta t < A$	Распознавание опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПЗЗ); Косвенный контроль опасных дуговых перенапряжений в сети; Выбор способа действия защиты (сигнал или отключение)
	$3I_{0(ВГ)*} > K$ $A < \Delta t < B$	Распознавание неопасных дуговых прерывистых ОЗЗ
	$3I_{0(ВГ)*} > K$ $\Delta t > B$	Распознавание кратковременных пробоев изоляции

Примечание: A, B, K – уставки по дополнительным параметрам.

*К.С.Алёшин, асп.; Н.В.Кузьмина, ст. преп.;
рук. В.А.Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОБОСНОВАНИЕ УСТАВОК ПО ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ 6–10 КВ

В алгоритмах функционирования микропроцессорных многопараметрических токовых защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) для сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, кроме действующего значения составляющей основной частоты 50 Гц $3I_{0(50)}$, используются также параметры, дополнительно характеризующие измеряемые токи $3i_0$:

1) относительный уровень высших гармоник (ВГ) в токе нулевой последовательности $3I_{0(ВГ)*} = 3I_{0(ВГ)} / 3I_{0(50)}$;

2) длительность интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции при дуговых замыканиях (ДЗЗ).

Контроль дополнительных параметров позволяет обеспечить распознавание основных разновидностей ОЗЗ: устойчивых (УЗЗ), наиболее опасных дуговых перемежающихся (ДПЗЗ), относительно безопасных для сети дуговых прерывистых (ДПрЗЗ) и кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции (КрЗЗ) – и на этой основе увеличить селективность и чувствительность токовых защит. Распознавание УЗЗ и ДЗЗ осуществляется на основе контроля относительного уровня ВГ в токе $3i_0$, распознавание ДПЗЗ и ДПрЗЗ (КрЗЗ) – на основе контроля двух параметров $3I_{0(ВГ)*}$ и Δt . Критерии измерения указанных параметров имеют вид:

$$\begin{array}{l} \text{– распознавание УЗЗ и} \\ \text{ДЗЗ:} \end{array} \quad \begin{array}{l} 3I_{0(ВГ)*} < K \text{ (УЗЗ); } \\ 3I_{0(ВГ)*} < K \text{ (ДЗЗ);} \end{array} \quad (1)$$

$$\text{– распознавание ДПЗЗ:} \quad 3I_{0(ВГ)*} > K; \Delta t < A; \quad (2)$$

$$\text{– распознавание ДПрЗЗ:} \quad 3I_{0(ВГ)*} > K; A < \Delta t < B; \quad (3)$$

$$\text{– распознавание КрЗЗ:} \quad 3I_{0(ВГ)*} > K; B < \Delta t. \quad (4)$$

Уставка по параметру K определяется соотношением относительного уровня ВГ в токе $3i_0$ при устойчивых и дуговых ОЗЗ; уставка по параметру A – максимальными значением $\Delta t = \Delta t_{\text{макс}}$, при которых в сетях 6–10 кВ возможна эскалация дуговых перенапряжений при повторных зажиганиях заземляющей дуги; уставка по параметру B – временем возврата сети в исходное состояние после гашения заземляющей дуги. На основе анализа результатов экспериментальных измерений в действующих сетях 6–10 кВ и результатов исследований на имитационных моделях получены следующие значения уставок: $K = 0,5 - 0,55$ о.е.; $A = 50 - 60$ мс; $B = 150 - 300$ мс.

А.Н. Антонов, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТН ПРИ ФЕРРОРЕЗОНАНСЕ В СЕТЯХ 6-35 КВ

В сетях с изолированной нейтралью при использовании электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН) в сочетании с определенными значениями величины суммарной емкости сети на землю возможно появление феррорезонансных явлений, которые могут возникать при различных коммутационных воздействиях, таких как включение ненагруженных шин, однофазные замыкания на землю, а также при работе трансформаторов напряжения в неполнофазных режимах [1]. Данные процессы сопровождаются значительными перенапряжениями, искажениями формы напряжения и токов. Таким образом, возникает задача выявления особенностей, характерных для такого рода процессов.

В данной работе представлен анализ частотных спектров фазных напряжений на первичных обмотках ТН при протекании феррорезонансов на частоте 23 Гц (рис. 1) в сети 10 кВ, работающей с изолированной нейтралью. Результаты проведенного анализа позволяют выявить ряд признаков для повышения эффективности мер по выявлению и предотвращению феррорезонансных явлений.

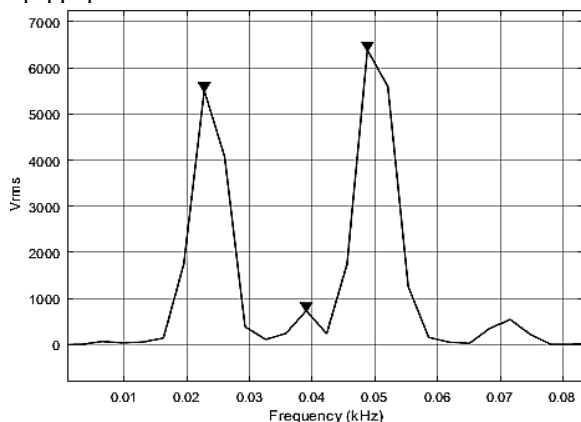


Рисунок 1 Частотный спектр фазных напряжений на первичных обмотках ТН при устойчивом феррорезонансе на частоте 23 Гц

Библиографический список

1. Дударев Л.Е., Волошек И.В., Левковский А.И. Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Электрические станции. – 1991. – № 1. – С. 66–71.

А.Н. Антонов, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Феррорезонансные явления являются одним из факторов, приводящих к повреждениям и выходу из строя электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН). Данная проблема актуальна для сетей разных классов напряжения, и сети 6-35 кВ, работающие с изолированной нейтралью, не исключение. Возникновение скачков напряжения и тока в обмотке нелинейной катушки приводит к ускоренному старению изоляции, ложным срабатываниям релейной защиты и повреждению оборудования [1]. Следовательно, существует потребность в анализе феррорезонансных явлений с помощью доступных средств моделирования, в частности с помощью средств имитационного моделирования.

В данной работе представлена имитационная модель в среде MATLAB Simulink, состоящая из сети с изолированной нейтралью и исследуемой группы однофазных электромагнитных ТН (рис. 1). Полученная модель позволяет моделировать протекание феррорезонансных процессов с учетом характеристик намагничивания реальных трансформаторов напряжения различных производителей.

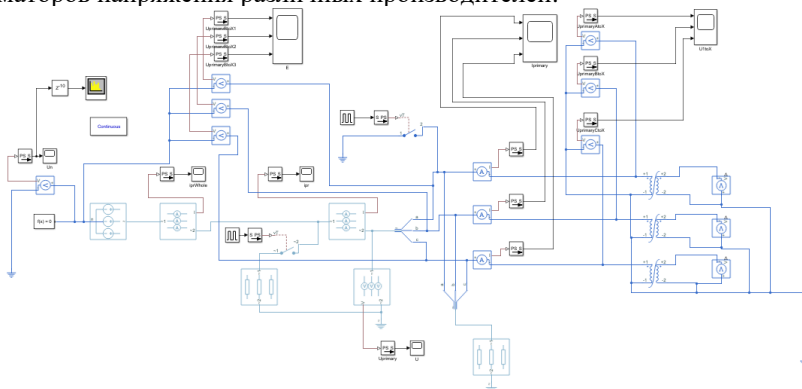


Рисунок 1. Имитационная модель в среде MATLAB Simulink для исследования феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью

Библиографический список

1. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Определение границ существования феррорезонанса в сети с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НТМИ-6-66 на основе компьютерного моделирования // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 12(82). – С. 9-16.

*Н.А. Бондаренко, студ.; Г.Е. Кибовский, студ.;
рук. Т.Г. Климова, к.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Автоматические регуляторы возбуждения синхронных генераторов (АРВ СГ) обеспечивают поддержание напряжения на обмотках генератора и демпфирование электромеханических колебаний. Традиционные ПИД-регуляторы могут быть неэффективны при различных схемно-режимных ситуациях.

Перспективным решением является адаптивная настройка АРВ методами искусственного интеллекта (ИИ).

Использование нейронных сетей позволяет аппроксимировать нелинейные зависимости и формировать управляющее воздействие на основе обучающих данных. Применение искусственных нейронных сетей в системах возбуждения обеспечивает улучшение переходных характеристик и повышение устойчивости синхронных генераторов [1].

Исследования методов на основе нечеткой логики показывают высокую устойчивость нечетких регуляторов к неопределенностям режима работы сети [2]. Эффективность данного алгоритма зависит от корректного задания функций принадлежности и базы правил.

Использование ANFIS, объединяющую в себе преимущества нейронных сетей и нечеткой логики позволяет существенно улучшить динамические характеристики синхронного генератора по сравнению с классическими ПИД-регуляторами [3].

Методы ИИ позволяют создать робастные адаптивные АРВ, работающие при различных схемно-режимных ситуациях.

Библиографический список

1. **Memon A.P., Uqaili M.A., Memon Z.A., Tanwani N.K.** Suitable Feedforward Artificial Neural Network Automatic Voltage Regulator for Excitation Control System // *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. – 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 45–51.
2. **Shouran M., Alenezi M.** Automatic Voltage Regulator Betterment Based on a New Fuzzy FOPI+FOPD Tuned by TLBO // *Fractal and Fractional*. – 2025. – Vol. 9. – No. 21.
3. **Lawal M.J., Hussein S.U., Saka B., Abubakar S.U., Attah I.S.** Intelligent Fuzzy-Based Automatic Voltage Regulator with Hybrid Optimization Learning Method // *Scientific African*. – 2023. – Vol. 19. – e01573.

*М.М. Васильченко, Р.М. Виноградов, бак.; А.Р. Тычкин, асп.;
рук. А. А. Яблоков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Актуальность. Основными характеристиками устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) являются селективность, чувствительность и быстродействие. Они обеспечиваются не только самими устройствами РЗА, но и трансформаторами тока (ТТ), используемыми в качестве источников информации о мгновенных значениях токов, протекающих через защищаемый объект. В связи с этим, при разработке и проверке алгоритмов функционирования РЗА необходимо учитывать погрешности преобразования тока ТТ. Выполнение проверок устройств РЗА технически и экономически целесообразно выполнять с использованием имитационных моделей ТТ. Одной из основных проблем при разработке имитационных моделей ТТ является отсутствие необходимой документации.

Цель работы – разработка методов и экспериментальной установки для определения параметров ТТ, используемых в их имитационных моделях.

Основные результаты исследования:

1. Разработаны методы и экспериментальная установка для определения параметров имитационных моделей ТТ.
2. Выполнено исследование ТТ при помощи специализированных анализаторов их характеристик (Omicron CT Analyzer, Ponovo PCT200) и разработанной экспериментальной установки.
3. Разработана программа для ЭВМ, выполняющая обработку экспериментальных данных и определяющая основные параметры и характеристики ТТ.
4. Проведено сравнение и анализ характеристик, определяемых разными методами.
5. Созданные имитационные модели ТТ, использующие параметры, определенные при помощи разработанной экспериментальной установки, по результатам экспериментальных исследований имеют мгновенную погрешность в переходных режимах не более 5%.

Д.Ю. Вихарев, асп.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВТОРИЧНОГО ТОКА ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ПРИ НАСЫЩЕНИИ ЕГО МАГНИТОПРОВОДА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ ВЕТВИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Насыщение магнитопровода трансформаторов тока (ТТ) в переходных режимах энергосистем может привести к неправильному действию устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Одним из наиболее перспективных направлений по повышению устойчивости функционирования устройств РЗА является восстановление вторичного тока (ВВТ). Для целей ВВТ предлагается измерять дифференциальную индуктивность ветви намагничивания в схеме замещения ТТ в режиме реального времени. Как показано в [1], значение этого параметра может быть получено с помощью источника высокочастотного напряжения, включенного во вторичную цепь ТТ. Восстановленное значение приведенного первичного тока рассчитывается в соответствии с выражением:

$$i'_{1(n)}(t) = i_2(t) + (R_2 + R_n) \int_0^t \frac{i_2(t)}{L_{\text{нам}}(t)} dt + (L_{\sigma 2} + L_n) \int_{i_2(t_0)}^{i_2(t)} \frac{1}{L_{\text{нам}}(t)} di_2,$$

где $i_2(t)$ – мгновенное значение вторичного тока; R_2, R_n – активное сопротивление вторичной обмотки и нагрузки ТТ соответственно; $L_{\sigma 2}$ – индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТ; L_n – индуктивность нагрузки ТТ; $L_{\text{нам}}(t)$ – значение дифференциальной индуктивности ветви намагничивания в схеме замещения ТТ; t_0 – момент времени, соответствующий насыщению магнитной системы ТТ.

Преимуществом способа является возможность восстановления вторичного тока при любой форме первичного тока вне зависимости от степени насыщения магнитной системы ТТ. В ходе обработки результатов вычислительных экспериментов с применением верифицированной математической модели ТТ типа ТОЛ-10 установлено, что полная погрешность восстановленного вторичного тока не превышает 10%.

Библиографический список

1. **Вихарев Д.Ю.** Определение факта насыщения магнитопровода трансформатора тока на основе непрерывного измерения сопротивления цепи намагничивания / П. Д. Айсин, Д. Ю. Вихарев, А. Ю. Мурзин, Н. А. Родин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – № 4. – С. 53-63. – DOI 10.17588/2072-2672.2024.4.053-063. – EDN CNDPLE.

И.А. Галанин, асп.;
рук. Т.Ю. Шадрикова, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ВЫБОР НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ 6-10 КВ

Введение. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) — наиболее распространённый вид повреждений (до 90%) в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. В зависимости от степени опасности ОЗЗ различают устойчивые и дуговые неустойчивые, которые обычно предшествуют устойчивым. Среди неустойчивых замыканий различают дуговые перемежающиеся (наиболее опасные сопровождающимися их перенапряжениями на неповрежденных фазах во всей сети), относительно безопасные дуговые прерывистые и кратковременные самоустраняющиеся замыкания на землю. При этом традиционные способы выполнения защиты от ОЗЗ не классифицируют виды замыканий на землю для выбора способа действия защиты (сигнал или отключение). Перспективным инструментом для решения этой задачи являются искусственные нейронные сети (ИНС).

О выборе ИНС для классификации разновидностей ОЗЗ. Для классификации ОЗЗ в рассматриваемых сетях выбрана рекуррентная нейронная сеть с длительной краткосрочной памятью Long Short-Term Memory (LSTM). ИНС архитектуры LSTM эффективно анализирует временные ряды, выделяет долгосрочные зависимости, подавляет шум и адаптируется к изменяющимся условиям. LSTM в онлайн режиме, то есть каждый раз при поступлении нового отсчета тока нулевой последовательности $3i_0$, в «скользящем окне» классифицирует текущий режим: без замыкания на землю, дуговое, устойчивое ОЗЗ. На вход нейронной сети подается прошлое выходное значений, 16 скрытых состояний и 32 отсчета тока $3i_0$. Перед подачей в ИНС сигналы нормализовались таким образом, чтобы их значения находились в диапазоне от 0 до 1. Это позволяет алгоритму не зависеть от колебаний напряжения и суммарного емкостного тока сети. На автоматизированной имитационной модели кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью в среде Simulink программного комплекса Matlab собраны обучающий и валидационный наборы данных.

Вывод. Разработана и обучена ИНС для классификации ОЗЗ – устойчивых и дуговых с использованием только тока $3i_0$ в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Точность распознавания на обучающем и валидационном наборах данных составила более 95%. Расчет на валидационном наборе данных переобучения ИНС не выявил.

*М.В. Двойников, инж., асп.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(АО «РАДИУС Автоматика», г. Москва; ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА БЛОКИРОВКИ ПРИ КАЧАНИЯХ ПО ПРИРАЩЕНИЮ ТОКОВ УСТРОЙСТВ СЕРИИ «СИРИУС»

Введение. Неправильные действия дистанционной защиты (ДЗ) при качаниях мощности и в асинхронном режиме предотвращаются алгоритмами блокировки, входящими в состав функции ДЗ устройств РЗА. Для устройств на микропроцессорной элементной базе возможно реализовать алгоритмы блокировки при качаниях (БК) разной степени сложности, например, алгоритм БК разрешающего действия при КЗ, основанный на приращении токов (БК-1).

Цель работы. Создание модели алгоритма БК-1 устройств серии «Сириус» для его дальнейшего исследования и совершенствования.

Метод исследований. Применяется метод имитационного математического моделирования в программном комплексе MATLAB. Модель верифицируется с помощью устройства серии «Сириус» с функцией БК-1 в составе функции ДЗ и устройства РЕТОМ.

Моделирование алгоритма БК-1 и его верификация. Модели алгоритма БК-1 и фрагмента сети с защищаемой ЛЭП с двусторонним питанием для испытаний БК-1 выполнены в соответствии с данными [1, 2] и информацией АО «РАДИУС Автоматика». Настройки алгоритма заданы в соответствии с данными моделируемой сети [2].

Верификация модели проведена на реальном устройстве серии «Сириус» с функцией БК-1 в составе функции ДЗ путём подачи на него с помощью устройства РЕТОМ COMTRADE-осциллограмм разных режимов работы сети, записанных с помощью модели сети в MATLAB.

Результат работы. Достоверность созданной модели БК-1 подтверждена экспериментально. Её выходные сигналы соответствуют выходным сигналам устройства на идентичные входные воздействия.

Выводы. По результатам работы возможно дальнейшее исследование алгоритма БК-1 и его совершенствование для функции ДЗ устройств серии «Сириус».

Библиографический список

1. **Микропроцессорное** устройство защиты «Сириус-3ВЧ-04». Руководство по эксплуатации БПВА.656122.176. – М.: АО «РАДИУС Автоматика», 2024.
2. **Технические** требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – СТО 56947007-29.120.70.241-2017 (с изменениями от 11.12.2019). – ПАО «ФСК ЕЭС».

*Ф.А.Жаравин, А.А.Калугин, Н.А.Трунилин, студ.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Точность измерения напряжения и тока определяется качеством выполнения функций измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) на вторичных обмотках трансформаторов напряжения (ТН) и является критическим фактором для надёжной работы релейной защиты, учёта электроэнергии и диагностики оборудования.

В эксплуатации проверку работы ТТ осуществляют построением вольт-амперной характеристики (ВАХ) и для снятия ВАХ используют разнообразное оборудование, например, приборы российского производства РЕТОМ 21(25), или зарубежной компании OMICRON CT Analyzer. Полученные ВАХ ТТ также используют для целей математического моделирования.

В целях исследования работы ТН при насыщении магнитопроводов во время феррорезонансных явлений также полезна информация о кривой намагничивания. Однако ассортимент инструментов для построения характеристик намагничивания ограничен, при этом известны приборы иностранных производителей OMICRON VOTANO 100 и Povoно PCT200i.

В целях исследований характеристик ТН класса 6(10) кВ были выполнены измерения и построения кривых намагничивания прибором PCT200i китайской компании Povoно, предоставленным компанией «ЭнЛАБ». Учитывая разнообразие подходов к построению характеристик намагничивания, было принято решение снять характеристики намагничивания и другими приборами, в том числе и CT Analyzer и провести сравнение результатов построений.

В работе выполнен сравнительный анализ характеристики трансформаторов напряжения нескольких производителей. Полученные кривые планируется также использовать для построения математических моделей ТН и моделирование их работы в переходных режимах.

Библиографический список

1. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Определение границ существования феррорезонанса в сети с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НТМИ-6-66 на основе компьютерного моделирования // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 12(82). – С. 9-16.

Д.М. Идрисов, асп.;
В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТТ

Измерение параметров электроэнергетических режимов относится к основополагающим функциям, без которых невозможна эффективная реализация объектов электроэнергетики. Актуальность исследований в данной области обусловлена стремлением предоставить точную информацию об измеряемых величинах во всех режимах работы.

Ключевым элементом, осуществляющим вышеуказанную функцию, является измерительный преобразователь тока (ИПТ), самым известным и широко применяемым видом которого является электромагнитный ТТ.

Традиционный электромагнитный ТТ обладает погрешностью, обусловленной его физическим принципом работы. С целью повышения точности измерения были разработаны и проведены многочисленные исследования способов компенсации погрешностей.

Один из наиболее эффективных способов компенсации заключается в следующем: магнитопровод электромагнитного ТТ составляется из двух одинаковых магнитопроводов, охватываемых общей вторичной обмоткой для подключения нагрузки, при этом на каждый магнитопровод наматывается дополнительная обмотка. Дополнительные обмотки соединяются между собой встречно-последовательно и подключаются к постороннему источнику переменного тока той же, либо утроенной частоты [1].

Отличительная особенность данного способа состоит в том, что при применении переменного тока утроенной частоты от постороннего источника магнитопровод размагничивается от остаточных магнитных потоков, в том числе от потока, создаваемого апериодической составляющей тока КЗ [1].

С целью анализа отмеченной особенности поставлена задача разработать математические модели и макетный образец электромагнитного ТТ с реализацией рассмотренного способа компенсации погрешности.

Библиографический список

1. **Трансформаторы тока** / В. В. Афанасьев [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1989. 416 с : ил. ISBN 5-283-04444-0.

Д.М. Идрисов, асп.;
В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТТ

Работа каждого электроэнергетического оборудования сопровождается особенностями, оказывающими влияние на общее функционирование электроэнергетической системы (ЭЭС). Например, особенности переманичивания электромагнитного ТТ, связанные с его принципом работы, могут привести к изменениям в работе подключенных вторичных систем.

Один из широкоизвестных способов анализа указанных особенностей состоит в разработке модели и проведении моделирования с известной долей допущений.

На текущий момент модели электромагнитного ТТ можно подразделить на три класса: физические, математические и физико-математические. Математические модели в свою очередь подразделяются на аналитические и имитационные. Преимущество математической модели заключается в возможности моделирования широкого спектра электроэнергетических режимов.

Моделированию электромагнитного ТТ посвящено большое количество исследований, разработаны различные подходы к моделированию. Имитационное моделирование в зависимости от глубины рассмотрения процессов переманичивания может быть выполнено в таких программных комплексах, как COMSOL, Matlab/Simulink, PSCAD. К настоящему времени известными способами представления процессов переманичивания в виде математической модели являются: модель Jiles-Atherton (JA), модель Прейзаха, модель Джон Чана, а также модель, основанная на уравнениях динамики переманичивания в работах Кадочникова А.И. [1].

В данной работе поставлена задача провести сравнительный анализ известных математических моделей процессов переманичивания с использованием имитационного моделирования. В перспективе планируется подготовить макетный образец электромагнитного ТТ и сравнить полученные результаты.

Библиографический список

1. **Кадочников А.И.** Динамические петли магнитного Гистерезиса. – Екатеринбург, 2007.

*А.А. Казакул, И.В. Попов
(АО «ДРСК», г. Благовещенск)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С РЕЗИСТИВНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ В ПВК ENERGY CS ТКЗ

Режим низкоомного резистивного заземления нейтрали является перспективной альтернативой изолированной нейтрали в сетях 6–35 кВ. Он ограничивает перенапряжения при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), выделяет активную составляющую тока и обеспечивает селективное действие ТЗНП.

Цель работы – смоделировать режимы ОЗЗ в сети 35 кВ с резистивно-заземленной нейтралью в ПВК Energy CS ТКЗ и оценить чувствительность защит.

На ПС 110/35/6 кВ Бурная в нейтральных трансформаторов ТДТН-40000/110 кВ установлены резисторы РЗ 4-200-35 ($R_p = 200 \text{ Ом}$). Рассмотрен участок сети Бурная – Эгершельд – Торгпорт.

Моделирование ОЗЗ выполнено в трёх режимах: нормальном, послепослеаварийном (Т-1 в ремонте) и при параллельной работе трансформаторов. Суммарный ёмкостной ток сети составляет 64,63 А.

Результаты моделирования показали расхождение с ручным расчётом менее 10 %. Ток ОЗЗ изменяется от 97,9 А до 198 А. Коэффициент чувствительность ТЗНП во всех режимах $k_{\text{ч}} > 1,25$ (от 1,47 до 2,98).

Проверка на соответствие СТО 18-2013 выявила два недостатка: завышенное сопротивление резисторов и отсутствие их защиты с действием на вводные и секционный выключатели.

Моделирование подтвердило достаточную чувствительность ТЗНП КЛ 35 кВ Бурная – Эгершельд 1, 2 во всех режимах. Рекомендуется оснастить Т-1 и Т-2 дополнительными комплектами ТЗНП для резервирования и выполнить защиту резисторов.

Библиографический список

1. Ершов А.М., Сидоров А.И. Режимы нейтрали электрических сетей: монография. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2024. 281 с.
2. СТО 18-2013. Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Изд. 6-е и 7-е (действующие разделы). Утв. Приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.

*Д.И. Кондратьев;
рук. А.А. Яблоков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА

Современные технологические процессы становятся все более чувствительными к качеству электроэнергии. При этом допустимое время перерыва питания может исчисляться десятками миллисекунд. Эту задачу решают устройства быстрогодействующего автоматического ввода резерва (БАВР), алгоритмы работы которых постоянно совершенствуются для повышения надежности питания потребителей. В основу модернизаций существующих устройств БАВР закладывается имеющийся опыт и данные о произошедших авариях. Одним из решений при совершенствовании БАВР является применение адаптивных уставок. Однако эта технология требует усовершенствования, так всё равно остаются сложные задачи, где работа может быть не идеальной (пуск мощных двигателей, колебания амплитуды сигналов, выход из строя трансформаторов тока и напряжения).

Эту проблему можно решить путем внедрения адаптивных алгоритмов в логику работы устройств БАВР. Но до их внедрения необходимо дополнительно исследовать логику работы БАВР, проанализировав возникающие при работе ошибки.

С помощью недавно созданной имитационной модели устройства БАВР в программном комплексе MATLAB/Simulink были проведены исследования его алгоритмов работы. Необходимые для их проверки сигналы, были взяты из типовой модели электрической сети нефтеперерабатывающего завода, которая позволяет отобразить многие виды аварийных ситуаций, в которых реальные устройства работают некорректно. Результаты исследований будут приведены в докладе.

Разработанная имитационная модель устройства БАВР, а также модель электрической сети стандартного нефтеперерабатывающего предприятия позволили оценить надежность работы алгоритмов реального оборудования. Это позволит провести модернизацию микропроцессорных терминалов БАВР.

Библиографический список

1. **Руководство** эксплуатации. Микропроцессорное устройство быстрогодействующего автоматического ввода резерва с восстановлением нормального режима электроснабжения БАВР «МИР»/ АПДЛ.656121003 РЭ2. Редакция №2 от 10.07.2024, 217 с.

*А.А. Краснов, И.А. Кошельков, П.Л. Воронов.
(ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары)*

РЕШЕНИЯ ДЕФИЦИТА КОММУТАТОРОВ С РТР НА ВАПС III ТИПА

Актуальность: ВАПС III типа требует синхронизации ≤ 1 мкс (МЭК 61850-9-2LE [1]). РТРv2 точен, но дорогие и дефицитные РТР-коммутаторы тормозят внедрение.

Цель: снижение потребности в РТР-коммутаторах без потери точности и надёжности РЗА.

Методы: Выделение РТР-коммутаторов в отдельный логический сегмент через MSTP (два кольца: РТР и остальной трафик). Отказ от РТР в пользу связки 1PPS + SNTP.

Результаты эксперимента: На стенде из 5 коммутаторов (3 с РТР, 2 без) обрывы связи не вызвали пропусков выборок и ошибок синхронизации; перестроение (десятки мс) не критично для РТР-кадров. Точность 1 мкс достижима, но требуется отдельный оптический кабель и разветвители (например, FOS-02-112).

Выводы: оба решения позволяют уменьшить или исключить импортные РТР-коммутаторы, сохранив качество синхронизации. Перспектива – отечественное коммуникационное оборудование.

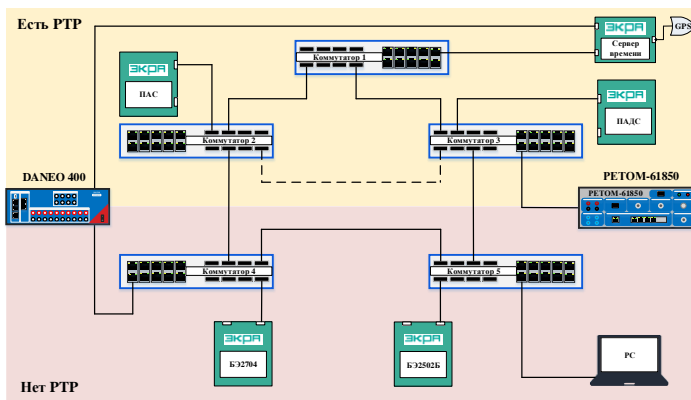


Рисунок 1. Схема подключения устройств на испытательном стенде.

Библиографический список

1. **Implementation** Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850-9-2.

*В.П. Кругликов, студ.; А.В. Панащатенко, асп.;
рук. А.А. Яблоков к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Нормативно-технические документы предписывают необходимость обеспечения корректной работы устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) в переходных режимах коротких замыканий (КЗ) с насыщением трансформаторов тока (ТТ). Проверка выполнения данных требований предполагает сравнение времени до насыщения магнитопровода ТТ ($t_{нас}$) и минимально необходимого времени точного преобразования тока УРЗА ($t_{рз}$). Выполнение условия $t_{рз} < t_{нас}$ гарантирует правильную работу УРЗА в переходном режиме КЗ.

Вследствие относительной новизны указанной проверки существующая методическая база определения параметров электромагнитных трансформаторов тока на стадии проектирования остается недостаточно проработанной. Предлагаемая в нормативно-технической документации [1] методика определения параметров ТТ обладает рядом недостатков: не учитывает величину активного сопротивления вторичной обмотки ТТ (R_2), использует для расчетов приближенные формулы коэффициента переходного режима и не учитывает соотношение фактической и номинальной мощности вторичной обмотки ТТ, что приводит к завышению требуемых параметров ТТ. «Ручные» расчеты по этой методике крайне длительны и трудоемки. В связи с этим актуальной научно-практической задачей является разработка автоматизированного инструмента расчета параметров ТТ, способного увеличить точность вычислений, снизить временные затраты и повысить адаптивность проектных решений.

Разработанный метод определения параметров ТТ использует уточненные формулы, определяющие худшую, с точки зрения $t_{нас}$, фазу тока КЗ, учитывает R_2 и соотношение фактической и номинальной мощностей вторичной обмотки ТТ при расчетах. Программная реализация метода позволяет применять алгоритм двойного перебора, что делает процесс выбора параметров ТТ более гибким и предлагает проектировщику множество вариантов подходящих параметров ТТ.

Библиографический список

1. **ГОСТ Р 71403 – 2024.** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Методические указания по определению параметров электромагнитных трансформаторов тока для обеспечения правильного функционирования релейной защиты в переходных режимах. Введ. 2024–07–02. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – 12 с.

*М.А. Крунов, студ.;
рук. Ю.Д. Кутумов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОБ АСПЕКТАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСТАВОК И ПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ РАСЧЁТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Введение. Согласно Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, в 2032-26 гг. предусматривается сооружение вставок и передач постоянного тока (ВПТ и ППТ), в том числе для увеличения пропускной способности электрической сети между объединенными энергетическими системами Сибири и Востока, выдачи мощности Нововоронежской АЭС-2 и Мокской ГЭС.

О моделировании ВПТ и ППТ. В настоящее время существуют следующие подходы к моделированию ВПТ и ППТ:

- ВПТ и ППТ не учитываются при расчётах токов короткого замыкания (КЗ) (Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания, 1998 г.);

- ВПТ и ППТ учитываются при моделировании как источники тока с током, равным току прямой последовательности в доаварийном режиме (Требования к формированию и актуализации математических моделей электрической сети для расчета параметров аварийного режима – АО «СО ЕЭС», 2024 г.);

- ВПТ и ППТ, их системы управления (регулирования) моделируются в каждом случае максимально точно в специализированном ПО (PSCAD и т.д.) (США, Китай).

Исследование возможности создания простой модели ВПТ и ППТ для расчёта токов КЗ при различных возмущениях (КЗ в зонах ближнего и дальнего резервирования, повреждения внутри ВПТ и ППТ) – актуальная задача.

Результаты исследований. В ходе исследований были установлены зависимости отклика ВПТ на короткие замыкания в зонах ближнего и дальнего резервирования защит отходящих от неё линий, а также на замыкания внутри самой ВПТ. Получено подтверждение возможности учёта ВПТ и ППТ как источника тока, но с учётом действия систем инжекции токов обратной последовательности в примыкающую сеть.

*Минаев К.Д. студ.;
рук. И.О. Шифрин, ст. преп.
(ПКИТ МГУТУ, г. Пенза)*

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ (WAMS) В КОНТУР АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ

Анализ крупных системных аварий показывает, что традиционная локальная автоматика [1] не видит общесетевой динамики и оставляет «слепые зоны», поэтому современный вектор развития заключается в интеграции систем мониторинга переходных режимов (WAMS) непосредственно в контур автоматического противоаварийного управления, где синхронизированные векторные измерения [2] используются не только для визуализации, но и для формирования управляющих воздействий в темпе процесса (идентификация источника колебаний, адаптация дозировок разгрузки), что превращает пассивную регистрацию аварий в активное демпфирование каскадных процессов и закладывает основу для перехода к цифровым двойникам энергосистемы [1,2] как расчетной среде управляющих алгоритмов.

Библиографический список

1. **Автоматическое** противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования : СТО 59012820.29.240.008-2008. – 2008.
2. **Мокеев А.В.**, Ачитаев А.А., Попов А.И., Бутин К.П., Родионов А.В. Идентификация и поиск источника низкочастотных колебаний на основе синхронизированных векторных измерений // *Электричество*. – 2024. – № 9. – С. 23–36. Богомолов Р.А. Цифровые двойники меняют процессы управления в энергосистеме // *Решения и управление в электроэнергетике*. – 2023. – № 2. – С. 36–40.

А.В. Панащатенко, асп.;
рук. А.А. Яблоков к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ АПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СХЕМАХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Ток короткого замыкания (КЗ) в схемах сложной конфигурации содержит не только периодическую составляющую, но и сумму нескольких аperiodических составляющих, изменяющихся экспоненциально со своими постоянными времени (T_a). Формульное представление кривой полного тока с использованием эквивалентной аperiodической составляющей с одной постоянной времени является приближенным, при этом погрешность данного допущения оказывает влияние на расчетную величину ударного тока и время до насыщения магнитопроводов ТТ, определяемое при данном коротком замыкании. Погрешности при расчетах указанных параметров могут приводить к некорректному выбору ТТ для целей релейной защиты и автоматики.

В ходе исследования был выполнен сравнительный анализ 14 различных методов определения постоянных времени аperiodических составляющих в токе КЗ с использованием верифицированной модели реального энергообъекта. Оценка каждого из методов была выполнена на основе расчета мгновенной погрешности между кривой полного тока КЗ, полученной по результатам имитационного моделирования, и кривой полного тока, рассчитанной по математической формуле с использованием определенных значений T_a .

Результатом выполненных исследований стал новый метод, разработанный для выполнения автоматизированных расчетов в сервисе «Лаборатория РЗА». Метод осуществляет автоматический обход всех возможных путей протекания тока (поиска возможных ветвей) питающих точку КЗ для заданной схемы, определяет величину тока и постоянную времени аperiodической составляющей в этой ветви. Полученные значения используются в формулах расчета коэффициента переходного режима ТТ, что позволяет оценить работу ТТ с максимально возможной точностью. Точность такого метода ограничена подробностью заданной пользователем расчетной схемы, которая как правило включает в себя непосредственно схему энергообъекта для которого ведутся расчеты, связи со смежными объектами к которым подключаются системные эквиваленты, а также обходные связи между смежными объектами.

*З.Ф. Пидько, студ.
(АмГУ, г. Благовещенск)*

ДИАГНОСТИКА СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

В условиях ЦПС классические цепи переменного тока и оперативного тока заменяются цифровыми потоками:

1. Информационные потоки: Вместо контрольных кабелей используются протоколы GOOSE (для дискретных команд управления и сигнализации) и Sampled Values (SV) (для передачи мгновенных значений токов и напряжений). 2. Архитектурные уровни: связывает первичные датчики (оптические трансформаторы, устройства сопряжения МУ) с терминалами ПА и обеспечивает связь между терминалами ПА, РЗА и системой верхнего уровня (АСУ ТП). 3. Виртуализация функций: Логика ПА может быть реализована как в выделенном IED (терминале), так и в виде программного модуля в централизованном контроллере [1].

Диагностика на ЦПС охватывает четыре уровня: 1. Физический уровень; 2. Сетевой уровень (L2/L3); 3. Логический уровень данных; 4. Синхронизация времени.

Для выявления неисправностей используются как встроенные, так и внешние средства: 1. Self-monitoring (Самодиагностика): Каждый IED формирует MMS-сообщения о внутренних ошибках программного обеспечения или аппаратных сбоях. 2. Сетевые анализаторы (Sniffers): Специализированное ПО и устройства, которые анализируют работу оборудования, не внося искажений, и визуализируют прохождение команд ПА. 3. Системы мониторинга и управления сетью (NMS): Использование протокола SNMP для контроля состояния активного сетевого оборудования. 4 Цифровые двойники и RTDS [3].

Библиографический список

1. СТО 56947007-25.040.30.309-2020 «Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО „ФСК ЕЭС“». 2020. – 257 с.
2. **Моисеев Д.В.**, Галанина Н.А., Иванова Н.Н. Разработка методики экспресс-анализа аварийных режимов электрической системы // Вестник Чувашского университета. - 2019. - № 3. - С. 167-175.
3. **Куликов А.Л.**, Вуколов В.Ю., Колесников А.А. Централизованная дифференциальная защита цифровой подстанции с применением метода двойной записи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. - № 2. – С. 31-39.

*С.А. Потапов, студ.,
рук. С.О. Алексинский, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ В РОССИИ: АНАЛИЗ И СТРАТЕГИИ РАЗМЕЩЕНИЯ

Цифровая трансформация мировой экономики, стремительное развитие искусственного интеллекта и науки о данных создают беспрецедентный спрос на вычислительные мощности и инфраструктуру хранения информации. Суперкомпьютеры, системы с экстремально большим объемом памяти и масштабные центры обработки данных стали критически важными активами для национальной безопасности, научного прогресса и технологического суверенитета. Однако их развитие ограничено — очень большое энергопотребление.

Российский системы «Яндекса» (~21.5 Пфлопс) стандартного теста High-Performance LINPACK (HPL). В китайском секторе - пиковая производительность достигает 2 эксафлопс (EFLOPS), на базе 160-180 тысяч процессоров MT-3000. При этом, её энергопотребление оценивается в 34,8 МВт.

В России энергопотребление всех российских центров обработки данных в 2025 году достигло уровня 1 ГВт; к 2030 году планируется наращиваться – до 2.5 ГВт, что требует повышение энергоэффективности. Факторы энергоэффективности размещения центров: место энергогенерации и принципы охлаждения, инфраструктура, кадры.

Есть предложение о целесообразности массового размещения центров инфраструктуры данных на Крайнем Севере. Холодный климат — важное условие, но его нивелируют дефицит энергии, инфраструктуры и кадров. Решение о размещении – это поиск компромисса между капитальными затратами (CAPEX) на строительство в сложных условиях и операционными расходами (ОРЕХ) на энергию и охлаждение. Часто более высокая стоимость строительства на Севере не окупается экономией на эксплуатацию. Наиболее реалистична гибридная модель с фокусом на энергоизбыточные регионы с умеренным климатом.

Библиографический список

1. PUE – главный показатель энергоэффективности современных ЦОД // *Contell*. – 2025. – 9 декабря. – URL: <https://contell.ru/pue-glavnyj-pokazatel-energoeffektivnosti-sovremennyh-czod/> (дата обращения: 26.01.2026).

*И.А. Потемкин;
рук. Г.А. Филатова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ УРЗА БЛОКОВ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРВИСА «ЛАБОРАТОРИЯ РЗА»

Для расчётов токов короткого замыкания (ТКЗ) в электроэнергетике широко используют имитационное моделирование. В настоящее время всё большую актуальность приобретают облачные технологии, поэтому для построения модели электрической сети атомной станции (модели прилегающей сети, энергоблоков и систем собственных нужд, рис. 1) был выбран облачный сервис «Лаборатория РЗА» [1].

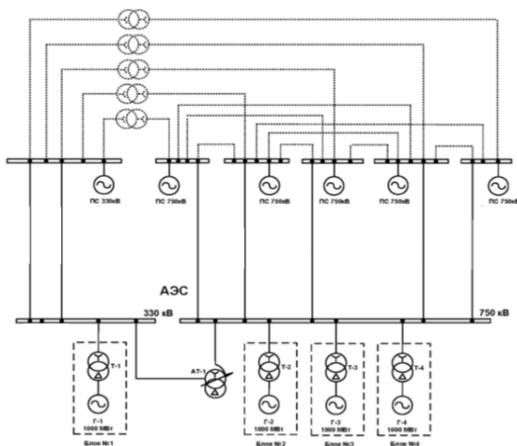


Рисунок 1. Схема моделируемого участка сети

С использованием модели были рассчитаны ТКЗ для расчета параметров срабатывания основных и резервных защит двух блоков «генератор-трансформатор» мощностью по 1000 МВт, выполненных на микропроцессорных устройствах зарубежного и отечественного производителя. Результаты ТКЗ сравнивались с расчетами в программе PSCAD. Для установившегося режима расхождение составило не более 3%.

Библиографический список

1. **Воробьева Е. А.** Расчеты токов короткого замыкания проектирования дистанционных и токовых защит ЛЭП в облачном сервисе "Лаборатория РЗА" / Е. А. Воробьева, О. А. Добрягина, А. С. Лифшиц. - Иваново, 2023. - 76 с.

*П.А. Резеньков, студ.;
рук., А.Е. Петров, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ORCAD НА ОСНОВЕ ПАСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Работа посвящена моделированию пуска АД в ПО OrCAD по подходу, изложенному в [1]. Проверяется согласованность паспортных данных с параметрами схемы замещения в соответствии с процедурой получения параметров, описанной в [2], при опоре на трактовку параметров модели, приведённой в [3]. Оценивается время пуска с учётом механизма на валу и состава питающей сети. Результаты моделирования сопоставляются с оценкой по выражениям из [3].

Пуск сопровождается повышением токов и просадкой напряжения на шинах АД и на смежных присоединениях, поэтому меняются условия срабатывания релейную защиту и автоматику (РЗА) и возможны ложные срабатывания. На разных этапах проектирования доступны разные по полноте и достоверности исходные данные о составе сети и нагрузке, поэтому оценку влияния пуска на РЗА следует формировать в условиях этой неопределённости.

Научная новизна состоит в систематическом сопоставлении результатов моделирования с расчётными оценками времени пуска по зависимостям из [3] и в демонстрации зависимости согласования этих оценок от модели внешней сети при согласовании исходных данных с параметризацией по [2]. Установлено расхождение при переходе к эквивалентам, отражающим реальные свойства питающей сети, что задаёт критерий применимости упрощённых формул из [3] и обосновывает необходимость уточнения границ их применения.

Библиографический список

1. **Резеньков, П. А.** Имитационная модель асинхронной машины в фазных координатах // *Электроэнергетика: Двадцатая всероссийская (двенадцатая международная) НТК студентов, аспирантов и молодых ученых. Материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 17–19 марта 2025 года.* – Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2025. – С. 103. – EDN HNBVTZV.

2. **Петров А.Е., Лебедев В.Д.** Совершенствование алгоритма расчета параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя и сравнение с существующими промышленными программами // *Вестник ИГЭУ.* – 2025. – №. 5. – С. 59-67. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.059-067

3. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.

Л. Р. Романов¹, асп., О. В. Крюков², д.т.н.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹, ООО «ТСН-электро»², г. Нижний Новгород)

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНО-ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

В настоящее время в электроэнергетике РФ происходит процесс модернизации и цифровизации, в том числе устройств РЗА и их алгоритмов принятия решений. Одними из основных направлений совершенствования алгоритмов защит, являются методы, основанные на машинном обучении и статистико-вероятностном подходе [1].

В докладе рассматривается один из перспективных способов повышения распознающей способности РЗА, основанный на линейном дискриминантном анализе (ЛДА). Обучение защиты производится на статистических данных, полученных многочисленными реализациями на имитационной математической модели по методу Монте-Карло [2]. Применение ЛДА позволяет эффективнее отделять друг от друга области нормальных и аварийных режимов (рисунок 1), тем самым повышая чувствительность защиты.

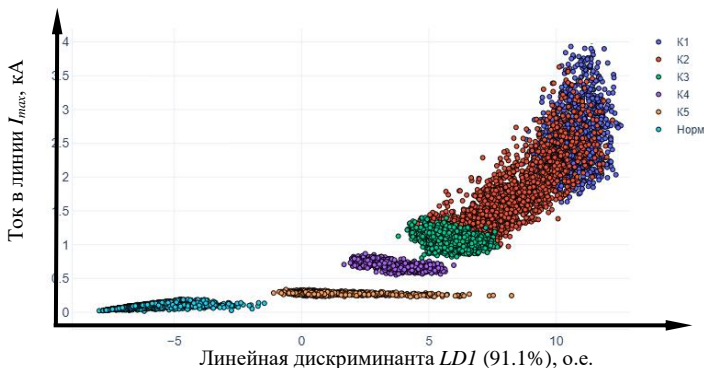


Рисунок 1. Область распределения режимов для многопараметрической токовой защиты (I_{max} , $I_{ав}$, фав, $I2/I1$) по главной дискриминанте (LD1)

Библиографический список

1. Лоскутов А.А., Куликов А.Л. Современные методы формирования логической части цифровой защиты и автоматики систем электроснабжения промышленных потребителей. – Нижнийгород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2025, 392 с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025686518 Российская Федерация. Анализатор информационных признаков для многопараметрической РЗА : заявл. 03.09.2025 : опубл. 02.10.2025 / Л. Р. Романов, М. В. Шарыгин.

А. А. Синяков, маг.;
рук. А. А. Яблоков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА (БАВР) «МИР 200»

Актуальность. На атомных электростанциях перерывы питания в цепях собственных нужд могут привести к останову циркуляционных насосов, нарушению охлаждения реактора и, как следствие, к аварийному останову реактора. Предотвращение данного развития событий возможно при использовании устройства быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР), обеспечивающие переключение на резервный источник питания менее чем за 0,1 с. Однако, возможны три типа неправильной работы БАВР:

- отказ в срабатывании или недопустимая задержка;
- ложное срабатывание;
- несинхронное включение.

Каждый из этих отказов ведёт к тяжёлым последствиям: глубокие просадки напряжения, механические повреждения оборудования и т.д. Следовательно, БАВР необходимо испытывать в режимах, максимально приближённых к реальным, чтобы подтвердить корректность его работы и выявить режимы, в которых его работа некорректна.

Цель работы – разработка математической модели электрической сети и алгоритмов испытаний БАВР в среде RSCAD согласно требованиям ПМИ [1]

Основные результаты исследования:

1. Разработана математическая модель электрической сети в программно-аппаратном комплексе моделирования энергосистем в режиме реального времени «RSCAD» для испытания устройства БАВР в соответствии с требованиями ПМИ [1].

2. Разработан алгоритм автоматического проведения цикла испытаний БАВР, реализованный средствами RSCAD и внешнего программного кода, написанного на языке Python.

Библиографический список

1. **ОТТ-29.130.00-КТН-119-17** (с изм. 1, 2). Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Устройства быстродействующего автоматического ввода резерва на основе быстродействующих вакуумных выключателей напряжением более 1000 В. Общие технические требования / ПАО «Транснефть». – М.: ПАО «Транснефть», 2024. – 63 с. – (Ознакомительная редакция).

*В.А. Титов, асп., Л.А. Глазкова, бак.;
рук. А.А. Яблоков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ УРЗА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Определение параметров срабатывания устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) выполняется по методикам, представленным в государственных нормативно-технических документах, стандартах организаций и эксплуатационной документации производителя. Существенные затраты времени на выполнение данных расчётов, необходимость высокой квалификации персонала для их выполнения, возможные ошибки в расчетах из-за человеческого фактора и активное внедрение цифровых технологий в электроэнергетику определяют актуальность задачи разработки методов и способов автоматизации данного вида расчетов.

Существующие решения в данной области не позволяют полностью автоматизировать определение параметров срабатывания УРЗА, поскольку в них отсутствуют модули расчёта токов короткого замыкания и/или графический интерфейс для создания моделей энергообъекта.

В результате выполнения проекта разработан конструктор методик определения параметров срабатывания УРЗА, встроенный в веб-сервис «Лаборатория РЗА», в котором есть необходимые модули для расчёта токов КЗ и создания имитационных моделей. Разработанный интерфейс позволяет гибко формировать различные методики и настраивать их под разные защиты и функции. Выражения и логика выбора уставок представляются естественным языком с возможностью автоматического определения необходимых коэффициентов. Одним из основных преимуществ конструктора стали возможность сквозного редактирования параметров (без необходимости вносить изменения в предыдущих окнах) и удобство создания расчётных выражений и условий.

*К.А. Фатеев, студ.;
рук. В.А. Орехов, доц.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И СЕЛЕКТИВНОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ УСТАВОК

Развитие распределённой генерации (РГ) в сетях 6–35 кВ изменяет уровни и направления токов КЗ. Традиционные защиты теряют селективность, что ведёт к ложным срабатываниям. Цель работы — разработка методики адаптивной коррекции уставок микропроцессорных защит при изменении режима сети с РГ.

Новизна подхода в параметрической адаптации токовых отсечек и МТЗ на основе оперативного расчёта токов КЗ. В отличие от фиксированных уставок методика предусматривает периодический пересчёт порогов срабатывания при изменении топологии сети или подключении новых источников РГ по данным телеметрии.

Разработан алгоритм расчёта тока срабатывания и коэффициента чувствительности с учётом подпитки места КЗ от РГ. Моделирование фрагмента сети 10 кВ с газопоршневой и солнечной генерацией в Matlab Simulink показало: адаптивные уставки обеспечивают селективность во всех режимах, фиксированные дают излишние срабатывания в 30% случаев.

Практическая значимость — модернизация терминалов РЗА без замены аппаратуры. Время пересчёта уставок не превышает 200 мс. Перспективы связаны с интеграцией методики в SCADA-системы распределительных сетей.

Библиографический список

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 2021. 592 с.
2. **Шалин А.И.** Особенности релейной защиты сетей с распределённой генерацией // Электричество. 2024. № 5. С. 18–26.
3. **IEEE Std 1547-2018.** Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources. IEEE, 2018. 138 p.

*Д.А. Харина, маг.
рук. Е.А. Воробьева, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СОЗДАНИЕ И АНАЛИЗ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СХЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД БЛОКА № 4 КАЛИНИНСКОЙ АЭС ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЦЕЛЯХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Устойчивость электрической части АЭС, в том числе устройств автоматического управления, — один из ключевых факторов надёжной работы станции. Эффективность релейной защиты и автоматики (РЗА) зависит как от корректности проектирования, так и от уровня эксплуатации. В связи с этим особую актуальность приобретает анализ функционирования устройств РЗА — как уже действующих, так и устанавливаемых в ходе модернизации — на различных электротехнических объектах АЭС: генераторах, трансформаторах, кабельных линиях, электродвигателях, шинах и пр., особенно в электрической части собственных нужд станции при возникновении повреждений и аномальных режимов.

Объектом исследования в настоящей работе являются электрическая схема и электротехническое оборудование собственных нужд блока № 4 Калининской АЭС.

Целью работы является разработка и анализ расчетной модели схемы собственных нужд блока № 4 Калининской АЭС для расчетов токов короткого замыкания, используемых при выборе параметров срабатывания устройств РЗА.

Объектом разработки является имитационная модель электрической схемы оборудования собственных нужд блока № 4 Калининской АЭС, реализованная в облачном сервисе «Лаборатория РЗА».

Полученные результаты позволят оптимизировать выбор электрооборудования для схемы и повысить качество проектирования устройств РЗА — в том числе для генераторов, трансформаторов, кабельных линий, электродвигателей и шин собственных нужд указанного блока станции.

Библиографический список

1. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. - Москва: ЭНАС, 2011. – 142 с.: ил., табл.; 24 см. - (Правила и инструкции).; ISBN 978-5-4248-0023-8.

*М.И. Цветков, студ.;
рук. Ю.Д. Кутумов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОБ АСПЕКТАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 КВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Введение. В настоящее время задача дистанционного определения места замыканий на землю (ДОМЗЗ) в кабельных сетях напряжением 6-10 кВ в полной мере не решена и остается актуальной.

Методы ДОМЗЗ можно разделить на следующие основные группы:

- методы ДОМЗЗ по параметрам аварийного режима;
- импульсные методы;
- алгоритмические методы (основанные на сравнении измеренных значений электрических величин переходного процесса и значений, полученных с помощью разработанной модели кабельной сети).

Об алгоритмических методах. Наиболее перспективной представляется третья группа методов (в рамках ИГЭУ методы ДОМЗЗ предлагались, в частности, в диссертационных исследованиях Филатовой Г.А. и Кутумова Ю.Д.), однако её применение ограничено в силу того, что в настоящее время не получены достаточно точные, но при этом достаточно простые модели кабеля. Основная сложность построения таких моделей заключается в том, что индуктивность (и активное сопротивление) моделируемых кабельных линий зависит от частоты, а информацию о расстоянии до места повреждения содержит именно высокочастотные (1...10 кГц) составляющие токов переходных процессов. Поэтому проблема моделирования указанных кабелей (в т.ч. приближенного, но не нарушающего точность метода ДОМЗЗ), является актуальной.

Результаты исследований. В ходе исследований были получены значения индуктивности и активного сопротивления контура «фаза-земля» для кабельных линий 6-10 кВ для различных частотных составляющих тока ОЗЗ, исследовано их распределение в сечении проводника кабеля.

Выводы. Для приближенного моделирования кабельной линии с целью реализации алгоритмов ДОМЗЗ можно использовать модель кабельной линии с жилами цилиндрического сечения, отражающими эффект вытеснения тока к поверхности проводника.

*Д.А. Шумилов, студ.
(УлГТУ, г. Ульяновск)*

ВАЖНОСТЬ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Надежность электроэнергетических систем определяется корректной работой защитных устройств (автоматических выключателей и УЗО), обеспечивающих отключение поврежденных участков сети. Актуальность темы связана с ужесточением требований безопасности и ростом доли автоматизированных систем. Даже исправные аппараты могут не сработать вследствие износа или неверной настройки, что требует регулярной проверки.

Испытательные аппараты позволяют моделировать аварийные режимы и контролировать параметры срабатывания: токовые уставки и время отключения. Современные цифровые комплексы обеспечивают высокую точность измерений, автоматизацию испытаний и регистрацию результатов для анализа [1].

Практическая значимость заключается в повышении надежности электроснабжения, снижении аварийности и повышении безопасности эксплуатации. Перспективы связаны с внедрением интеллектуальных систем мониторинга и диагностики [2].

Библиографический список

1. **Шабад М.А.** Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. М.: Энергия, 2017.
2. **Чернобровов Н.В.** Испытания электрооборудования и средств защиты. М.: Энергоатомиздат, 2015.

А.В. Шустров, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОПРОВОДОВ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Применяемые в настоящее время электромагнитные трансформаторы тока (ЭМТТ) имеют основной недостаток – насыщение магнитопровода. Цифровые измерительные трансформаторы тока (ЦИТ) исключают данный недостаток, гарантируют точность в широком диапазоне токов, абсолютно взрывобезопасны и передают данные в цифровом формате [1].

Типовая конструкция ЦИТ включает три первичных преобразователя тока (ППТ): малагабаритный трансформатор тока (МТТ), пояс Роговского и датчик постоянного тока [2]. Их специфические эксплуатационные и схемотехнические недостатки обуславливают необходимость разработки нового универсального ППТ. Исследование направлено на формирование информационной базы для создания такого преобразователя.

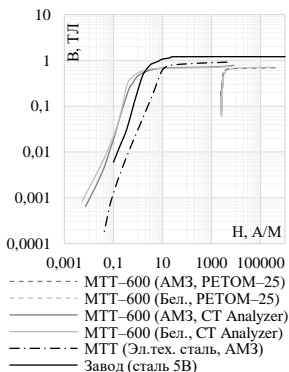


Рис. 1. Кривые намагничивания

Главным результатом работы стало экспериментальное определение кривых намагничивания магнитопроводов МТТ различных производителей с помощью комплексов РЕТОМ-25 и СТ Analyzer. Исследование выявило различие в алгоритмах работы приборов: на малых токах СТ Analyzer демонстрирует гораздо большее совпадение снятой характеристики с приведённой заводом-изготовителем (рис. 1).

Результаты исследования подтверждают преимущество применения аморфной стали. Её высокая магнитная проницаемость и малая коэрцитивная сила кардинально миними-

зируют погрешности, делая материал оптимальным для проектирования нового ППТ.

Библиографический список

1. Гречухин В.Н. Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем: «Вестник ИГЭУ», Вып. 4, 2006.

2. Цифровые измерительные трансформаторы [Электронный ресурс] // ООО НПО "Цифровые измерительные трансформаторы": [Офис.сайт]. 2015. URL: <https://di-gi-trans.ru/> (дата обращения: 20.03.2026).

А.В. Шустров, асп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Переход современной электроэнергетики к концепции «Цифровая подстанция» невозможен без замены традиционных измерительных трансформаторов. Классические электромагнитные устройства обладают рядом физико-технических недостатков: насыщение магнитопровода аperiodической составляющей тока короткого замыкания, риск возникновения феррорезонанса, погрешности передачи данных по аналоговому вторичным цепям, а также высокая взрывоопасность.

Решением этих проблем является внедрение цифровых измерительных трансформаторов (ЦИТ). В ЦИТ применяются альтернативные первичные преобразователи: катушки Роговского, магнитотранзисторы и ёмкостные делители напряжения, что позволяет избежать насыщения и расширить динамический диапазон. Так катушка Роговского благодаря отсутствию магнитопровода обладает высокой линейностью, что обеспечивает точность измерений как для коммерческого учёта, так и релейной защиты в широком диапазоне [1]. Цифровая обработка сигналов (ЦОС) на основе получения вектора по одной выборке из сигналов двух разных первичных датчиков и передача данных по оптоволокну в соответствии с МЭК 61850-9-2 формируют точную, надёжную и безопасную измерительную среду.

Перспективы развития ЦИТ связаны с совершенствованием датчиковой системы, ЦОС и расширением функционала. Встроенные вычислительные мощности позволяют перенести ряд задач прямо в электронный блок ЦИТ, включая функции защит абсолютной селективности, синхронизированные векторные измерения, фиксацию высокочастотных волновых фронтов для определения места повреждения и непрерывную самодиагностику [2].

Внедрение ЦИТ является необратимым шагом, который не только повысит точность учёта электроэнергии и эффективность защит, но и заложит базу для повышения киберфизической устойчивости и перехода к обслуживанию оборудования по его реальному состоянию.

Библиографический список

1. **Плакидин Р.С.**, Ульянов Д.Н., Андреев П.И., Мокеев А.В. Применение датчиков тока на основе катушки Роговского для комбинированных измерительных трансформаторов с цифровым выходом // Релейщик. – № 2 (49). – 2024. – С. 10-14.
2. **Лебедев В.Д.**, Яблоков А.А., Филатова Г.А. и др. Мультифункциональная система на основе цифрового трансформатора тока и напряжения в рамках цифровой подстанции // Теория и практика проектного образования. № 3 (11), 2019. – С. 96-103.

СЕКЦИЯ 15

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

Председатель – к.т.н., доцент Тихов М.Е.

Секретарь – к.т.н., доцент Долгих И.Ю.

*Д.С. Акентьев, Н.А. Жигарев, студ.;
рук. В.А. Смолин, к.т.н.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)*

ПРИНЦИП РАБОТЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ

Магнетронные устройства применяются в микроэлектронике для генерации СВЧ-излучения и нанесения тонких пленок. Принцип работы основан на взаимодействии электрического и магнитного полей.

В СВЧ-магнетроне электроны, эмитируемые катодом, движутся к аноду, но под действием магнитного поля их траектории искривляются, увеличивая длину пути и обеспечивая передачу энергии электромагнитному полю. Это позволяет генерировать микроволновое излучение, применяемое в промышленности, медицине и радиолокации.

В магнетронном распылении реализуется тлеющий разряд в среде инертного газа. При подаче напряжения в среде инертного газа возникает тлеющий разряд. Электроны удерживаются магнитным полем у поверхности катода, что повышает ионизацию. Образующиеся ионы бомбардируют мишень, вызывая выбивание атомов материала, которые затем осаждаются на подложке в виде тонкой пленки.

Данный Метод обеспечивает получение плотных и однородных покрытий и широко используется для металлизации, формирования барьерных слоев и оптических покрытий .

Таким образом, магнетронные устройства являются эффективным инструментом для генерации излучения и формирования функциональных покрытий [1].

Библиографический список

1. Маттокс Д.М. PVD процессы. – 2010.

*Е.М. Антонова, студ.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗЛОПАСТНЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Компании различных сфер используют маломощные датчики. Часто их устанавливают в местах, где подключение к общей электросети экономически нецелесообразно или технически невозможно. Наиболее часто для их питания используют аккумуляторы или гибридные установки, в которых комбинируются солнечные панели и ветрогенераторы. Очевидным недостатком является то, что данным установкам необходимо регулярное техническое обслуживание.

Малоизвестными, но перспективными ветрогенераторами являются безлопастные установки. Безлопастная турбина представляет собой цилиндр, который начинает колебательные движения под воздействием турбулентности воздушных потоков. Для максимальной выработки энергии высоту маятника подстраивают так, чтобы частота его собственных колебаний совпадала с частотой вихрей. Магнитная система внутри автоматически подстраивает жесткость, расширяя рабочий диапазон скоростей ветра [1]. Из преимуществ таких генераторов можно выделить бесшумность работы, компактность и легкость самого генератора, низкую стартовую скорость работы. Кроме того, по сравнению с классическими ветроустановками, стоимость производства таких установок ниже на 53%, а эксплуатации на 80% из-за отсутствия вращающихся элементов [2].

На данный момент данные установки находятся в стадии разработки и представлены несколькими образцами. Их технические показатели отличаются от классических ветрогенераторов: КПД на 30% ниже, а максимальная мощность достигает всего 100 Вт [3]. Несмотря на это, развитие данной технологии перспективно в условиях плотной городской застройки или на удаленных объектах, где энергоснабжение через общую сеть, аккумулятор или гибридную установку трудно выполнимо.

Библиографический список

1. **Sam Davis** Ветряная турбина без лопастей // РадиоЛоцман. - 2015. - №48. - С. 34-37.
2. **Электроэнергия** из вихря: ветрогенератор без лопастей // Глобальная энергия URL: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/04/13/elektroenergiya-iz-vihrya-vetrogenerator-bez-lopastej/> (дата обращения: 19.04.2026)
3. **J. Breen, W. Mallik, S. Adhikari** Performance analysis and geometric optimization of bladeless wind turbines using wake oscillator model // Renewable Energy. - 2025. Vol. 254.

*К.С. Бакаев, студ.;
рук. И.Ю. Долгих, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДУКТОРА

В настоящее время индукционный нагрев является прогрессивным электротехнологическим процессом, широко используемым для реализации различных видов термической и термохимической обработки металлических деталей, а также предварительного подогрева заготовок перед их обработкой давлением. Основным элементом оборудования индукционной нагревательной установки является индуктор, выполняемый в большинстве случаев в виде многovitковой цилиндрической катушки. В этом случае для эффективного индукционного нагрева поверхностей различного вида посредством кольцевого индуктора необходим корректный учёт физических эффектов, влияющих на распределение переменного тока в проводнике, что обуславливает необходимость разработки и исследования соответствующей электромагнитной модели.

В данной работе модель цилиндрического индуктора разработана в двумерной осесимметричной постановке в квазистационарном приближении через азимутальную составляющую векторного магнитного потенциала. В этом случае геометрия модели представляется в виде сечений витков, расположенных с одной стороны от оси симметрии. Настройка модели требует ввода параметров, определяющих величину и частоту напряжения на индукторе, а также удельную электрическую проводимость материала. В то же время моделирование многovitковой катушки в двумерной постановке требует ввода настроек электрической связи между её витками, что достигается совместным решением полевой и цепной задач. Результаты расчёта модели могут быть представлены в виде поверхностных и контурных графиков, характеризующих распределение магнитного поля, плотности тока и объёмной плотности тепловыделения в области моделирования. Кроме того, могут быть определены численные значения технологических и энергетических параметров индуктора (сопротивление, индуктивность, мощность).

Разработанная модель цилиндрического индуктора может быть использована при анализе технологических процессов, основанных на индукционном нагреве поверхностей различного вида. Варьирование параметров модели, характеризующих конструкцию индуктора и режим работы индукционной установки, может быть положено в основу оптимизации исследуемого технологического процесса.

*Б.Н. Баянов, студ.;
рук. Д.С. Расказа, к.т.н.
(СФ МЭИ, г. Смоленск)*

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ Понижающих DC-DC Преобразователей и Методы Их Решения

Понижающие импульсные преобразователи напряжения (DC-DC) широко применяются в системах питания электронной аппаратуры для получения стабильного выходного напряжения при высокой эффективности и малых потерях [1], однако при использовании упрощённых схем и бюджетных компонентов возникают проблемы, снижающие качество питания и надёжность устройств.

Актуальность работы связана с необходимостью повышения стабильности параметров при сохранении низкой стоимости; цель — анализ недостатков простых DC-DC преобразователей и определение способов их устранения. На практике наблюдаются пульсации выходного напряжения вследствие недостаточной фильтрации и нестабильной работы ключевых элементов, а также отключения напряжения при изменении нагрузки [2].

Существующее влияние оказывают паразитные параметры компонентов, включая сопротивление дросселя и эквивалентное последовательное сопротивление конденсаторов, что приводит к потерям и снижению КПД [1], а ошибки выбора частоты переключения и параметров LC-фильтра увеличивают пульсации.

Дополнительной проблемой является отсутствие эффективной обратной связи в простых схемах, что вызывает нестабильность напряжения при изменении входных условий и может сопровождаться перегревом силовых элементов, снижающим надёжность [3].

Повышение эффективности достигается введением обратной связи, оптимизацией параметров LC-фильтра и частоты переключения, а также применением компонентов с низким внутренним сопротивлением и специализированных ШИМ-контроллеров, что позволяет стабилизировать режим работы и уменьшить пульсации; при этом важным является корректный выбор элементной базы и теплового режима работы [2], [3].

Библиографический список

1. **Erickson R. W.**, Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. Springer, 2001.
2. **Texas Instruments.** DC/DC Switching Regulators. Application Notes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ti.com>
3. **Pressman A. I.** Switching Power Supply Design. McGraw-Hill, 2009.

*В.М. Будакова, Е.С. Бершанская, А.Н. Дюльдина, студ.;
рук. Г.В. Чекан, к.т.н., И.Ю. Долгих, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК АЭС

Современные атомные и тепловые электростанции функционируют как сложные энергетические комплексы, безопасность которых напрямую зависит от достоверности информации о состоянии оборудования. Ключевую роль в её сборе играют измерительные датчики, контролирующие давление, температуру, расход и другие параметры [1, 2]. Отказ или метрологический дрейф даже одного такого устройства может исказить картину технологического процесса и спровоцировать развитие аварийной ситуации, что на объектах ядерной энергетики сопряжено с особыми рисками.

Эксплуатация средств измерений на объектах энергетики связана с воздействием комплекса дестабилизирующих факторов, что обуславливает повышенные требования к их надёжности. При этом в процессе эксплуатации в измерительных датчиках могут наблюдаться различные виды неисправностей, в том числе метрологический отказ, засорение импульсных линий, отказ электронного тракта, а также ошибки монтажа и настройки. Для минимизации рисков, связанных с отказами измерительных каналов, в практике проектирования и эксплуатации АЭС и ТЭС применяются следующие методы: структурное резервирование (дублирование), при котором наиболее ответственные параметры контролируются посредством не менее трех независимых датчиков, работающих параллельно; метрологическая поверка и калибровка, заключающаяся в периодическом сравнении показаний рабочих датчиков с эталонными значениями с целью выявления и устранения метрологического дрейфа; регламентное техническое обслуживание, связанное с проведением профилактических мероприятий (очистка, внешний осмотр, проверка работоспособности); применение различных физических принципов измерения для контроля одного параметра.

Измерительные датчики, несмотря на их компактные размеры, являются критическими элементами систем безопасности и управления АЭС и ТЭС. Их надёжность и метрологическая стабильность являются необходимым условием безопасной и экономически эффективной эксплуатации генерирующих мощностей. Традиционные подходы (резервирование, периодическая поверка) в сочетании с современными тенденциями цифровизации – внедрением интеллектуальных датчиков с функциями самодиагностики и прогностической аналитики – позволяют качественно повысить уровень ситуационной осведомленности персонала. Инвестиции в модернизацию измерительных комплексов и повышение их отказоустойчивости следует рассматривать как стратегические вложения в промышленную безопасность и надёжность энергосистемы в целом.

Библиографический список

1. **Мониторинг** атомных электростанций (АЭС) // TML Japan – Японские измерительные технологии : [сайт]. – URL: <https://www.tmljp.ru/solutions/927/> (дата обращения: 10.03.2026).
2. **Реут, О. П.** Методы и приборы контроля водно-химического режима ТЭС : учеб.-метод. пособие / О. П. Реут, В. П. Куличенков, А. А. Чепуркин. – Минск : БНТУ, 2015. – 78 с.

*Е.В. Вязовцева, студ.;
рук. И.Ю. Долгих, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАГРЕВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Одним из прогрессивных электротехнологических процессов является индукционный нагрев, основанный на преобразовании энергии переменного электромагнитного поля в тепловую вследствие наведения в нагреваемом объекте вихревых токов. Высокая скорость нагрева и возможность нагрева части заготовки делает актуальным его использование при осуществлении различных видов термической обработки для придания деталям требуемых эксплуатационных свойств. Так, например, распространённой технологической операцией является поверхностная закалка, позволяющая повысить износостойкость деталей и их способность выдерживать ударные нагрузки. В данной работе рассмотрен вопрос моделирования численными методами температурных процессов при нагреве внутренними источниками тепла цилиндрической заготовки на всю длину, что соответствует одновременному способу реализации индукционной поверхностной закалки.

Решение поставленной задачи может быть получено в двумерной осесимметричной постановке посредством решения уравнения, описывающего нестационарную задачу теплопроводности. Исходными данными модели являются тепловыделение в объёме заготовки, а также физические свойства её материала (теплопроводность, теплоёмкость, плотность). Указанные физические свойства существенно изменяются в процессе нагрева, что необходимо учитывать вводом соответствующих функциональных зависимостей. Настройка граничных условий позволяет учесть теплообмен между нагреваемым изделием и окружающей средой посредством конвекции и излучения. Результатом расчёта модели является распределение температурного поля в заготовке, которое может быть получено для различных временных интервалов в соответствии с выбранным шагом сохранения результатов.

Разработанная модель может быть использована для анализа температурных процессов индукционного нагрева цилиндрических заготовок, при корректном учёте параметров моделирования. Важной особенностью модели является возможность использования заложенных в неё принципов при выполнении совместных электротепловых расчётов, что необходимо для оптимизации конструкции индуктора и выбора режима работы индукционной установки.

*А.А. Заводчиков, студ.;
рук. К.Р. Уразбахтина ассистент
(УУНиТ, г. Уфа)*

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Одним из важных условий реабилитации пациентов с ожогами является организация пространства их пребывания в ожоговом центре, так как загрязнения и взвеси в воздушном потоке повышают риск заражения. Предлагаемое техническое решение направлено на определение ламинарности воздушного потока в палатах ожогового центра с помощью воздухораспределителей, которые на данный момент производятся в основном зарубежом и мониторинг качества их работы является важной проблематикой. Решение работает следующим образом: ламинарный поток воздуха с помощью генератора, работающего от турбины вырабатывает постоянный сигнал, поддающийся на микроконтроллер, что является нормальной работой системы. Если турбина не вращается с постоянной скоростью, то на микроконтроллер сигнал не поступает и подаётся сообщение о сбое в работе. Разработка состоит из группы электродвигателей с лопастями и микроконтроллера с Wi-Fi-модулем, который непрерывно собирает данные о работе системы, формирует пакет данных и отправляет его по Wi-Fi на заранее настроенное устройство — любое оборудование для вывода данных о работе умной палаты для технического персонала. Инженер может установить на телефон приложение или использовать мессенджер с поддержкой ботов для приёма уведомлений о нарушении ламинарного потока. Персонал ожогового центра получает уведомление, после чего может оперативно принять меры — проверить работу вентиляции, закрыть дверь, убрать препятствия на пути воздушного потока. Ожоговые палаты имеют площадь от 20 до 50 квадратных метров, а турбулентные зоны могут возникать локально, поэтому необходимо подключение нескольких электромехатронных систем к одному микроконтроллеру. Каждое устройство при обнаружении турбулентности отправляет сообщение на микроконтроллер с указанием своего идентификатора, после сбора информации, установленных около одной койки данные передаются на устройство технического персоналу. Wi-Fi-канал позволяет вести электронный журнал отчетности. Предлагаемое техническое решение обладает простой и надежной конструкцией, невысокой стоимостью, что обуславливает его высокий потенциал к внедрению в медучреждения Российской Федерации.

*Н. С. Зыков, студ.;
рук. А. В. Макаров к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ

Главными проблемами при разработке источника питания для аргонодуговой сварки являются: энергосбережение и негативное влияние потребителей на питающую сеть. Эти факторы регулируются стандартом ГОСТ ИЕС 61000-3-2 – 2017 [1].

Целью данной работы является разработка источника питания (рисунк 1) для аргонодуговой сварки для минимизации негативного влияния на сеть с учётом официально принятых стандартов.

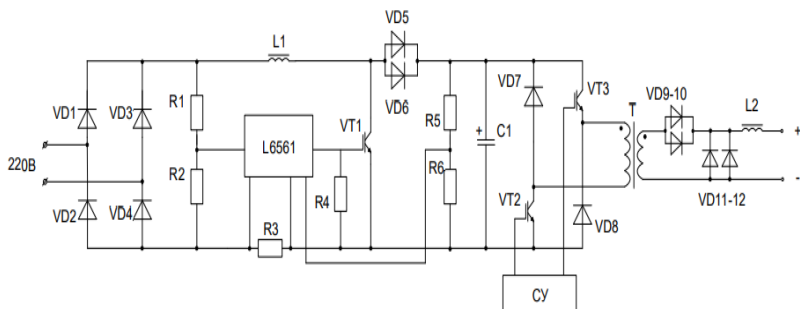


Рисунок 1. Схема источника питания

В ходе работы была произведена разработка и исследование источника питания для аргонодуговой сварки. Для снижения действующего значения потребляемого тока в источнике применен корректор коэффициента мощности. Произведен расчет силовой части источника и выбраны силовые элементы для него.

В результате исследования источника питания с помощью программы MATLAB получены соответствующие диаграммы токов. Разработано программное обеспечение микроконтроллера в виде обобщённых блок-схем, иллюстрирующих основные алгоритмы работы системы управления источником питания.

Библиографический список

1. ГОСТ ИЕС 61000-3-2 – 2017. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе).

*Д.В. Качинская, студ.;
рук. В.А. Смолин, доц.
филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске*

СТРУКТУРА АРКАДНОГО ИГРОВОГО АВТОМАТА

Аркадные игровые автоматы – специализированные электронные устройства для развлечений. Включают механические, электронные и программные компоненты для взаимодействия с пользователями.

Аркадный игровой автомат состоит из корпуса с жёсткой рамой, облицовкой и панелью управления с кнопками и джойстиком. В механическую часть входят крепления для компонентов, механизм выдачи призов и блок ввода средств с монетоприёмником, купюроприёмником и считывателем карт. Дисплейный блок включает основной экран, индикаторы статуса и баланс, а также верхний дисплей с логотипом. Вычислительный блок содержит процессор, память, программное обеспечение, генератор случайных чисел и интерфейсы для периферийных устройств. Аудиосистема состоит из усилителя, динамиков и модуля звуковых эффектов. Блок питания включает преобразователи напряжения и стабилизаторы. Система связи и учёта связывается с сервером через Ethernet или RS-232, печатает билеты и имеет датчики состояния. Защитные элементы включают замок, антивандальную защиту и датчики несанкционированного вмешательства для технического обслуживания. [1]

Пользователь вносит средства через блок ввода, что запускает игровой режим. На дисплее отображается процесс игры, управление позволяет взаимодействовать с ней, а аудиосистема сопровождает действия. По завершении раунда вычислительный блок обрабатывает результаты (выигрыш или проигрыш) и обновляет баланс. При выигрыше может быть выдан билет или физический приз. Информация о транзакциях передаётся на сервер учёта.

Структурная схема аркадного игрового автомата отражает его типовую архитектуру. Современные модели могут включать сенсорные экраны, Wi-Fi-модули и биометрические датчики, но основной принцип остается неизменным. Понимание схемы важно для проектирования, обслуживания и модернизации устройств.

Библиографический список

1. **Соколов, Д.В.** Аркадные автоматы / Д.В. Соколов // Большая российская энциклопедия. — 2024. — 26 ноября. — URL: [https://bigenc.ru/c/arkadnye-avtomaty-e996a5] (дата обращения: 15.04.2026).

Д.В. Короткевич, П.С. Колмачёва, студ.;
рук. Г.А. Рудченко, к.э.н., доц.
(ГГТУ им. П. О. Сухого, г. Гомель)

ВОДОРОД В УСТОЙЧИВЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ: ИННОВАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Водород ключевой элемент устойчивой энергетики, однако его производство и переработка остаются сложными и дорогостоящими процессами. Автоматизация, особенно с внедрением искусственного интеллекта, открывает новые перспективы. Современные методы переработки включают извлечение водорода из газа, воды или биомассы, его очистку, мембранную и адсорбционную концентрацию, а также сжатие и хранение. Автоматизация производственных линий, системы мониторинга с датчиками и энергоменеджмент уже сегодня повышают эффективность и безопасность, снижая риски человеческой ошибки. Ключевая инновация — интеграция искусственного интеллекта. ИИ позволяет точнее прогнозировать и оптимизировать технологические режимы, проводить автоматическую диагностику оборудования и управлять процессами в реальном времени. Это ведёт к снижению затрат и повышению конкурентоспособности водорода. В перспективе автоматизация на базе ИИ обеспечит не только рост производительности и экологические преимущества за счёт сокращения выбросов, но и развитие доступной водородной инфраструктуры. Таким образом, внедрение ИИ становится главным драйвером перехода к чистому и экономически выгодному водородному топливу [1],[2].

Библиографический список

1. **Федотов В.А.**, Лукьянова Е.С., Мальшев С.Н. Влияние твердозерности пшеницы на процесс выпечки сахарного печенья. — Текст : электронный. // *Новости науки 2024: гуманитарные и точные науки: сборник материалов XLIII международной научно-практической конференции*, том 2. — Москва: НИЦ «Империя», 2023. — С. 42. — URL: https://empirya.ru/f/sbornik_ngt-43_tom_2.pdf#page=42 (дата обращения: 12.04.2026).
2. **Макарян И.А.**, Седов И.В. Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики. — Текст : электронный. // *Институт проблем химической физики Российской академии наук*. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-mirovoy-vodorodnoy-energetiki/viewer> (дата обращения: 12.04.2026).

*П.В. Сплендер, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ РАЗМЕРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ВИБРОМЕТРА

Магнитожидкостные виброметры (МЖВ) предназначены для проведения диагностики состояния оборудования электростанций, на которое воздействуют вибрации с различной частотой и амплитудой.

МЖВ состоят из немагнитопроводного корпуса, на котором установлена измерительная обмотка [1]. Корпус виброметра крепится к оборудованию. Основным узлом виброметра является магнитный подвес. Он состоит из чувствительного элемента в форме кольцевого постоянного магнита, и двух статических магнитов, расположенных по отношению к нему одноименными полюсами. Магнитная жидкость (МЖ) удерживается между корпусом и чувствительным элементом пондеромоторной силой. Возникновение вибраций на оборудовании приводит к перемещению чувствительного элемента и наведению ЭДС в измерительной обмотке. Обработанный электронным блоком сигнал предотвращает аварийную ситуацию.

На чувствительный элемент действуют две одинаковые силы со стороны статических магнитов, уравнивающие его положение, и сила тяжести, которая уменьшает зазор между ним и нижним статическим магнитом. Это снижает точность измерений уровня вибраций. Компенсация силы тяжести достигается: увеличением площади нижнего статического магнита или повышением его коэрцитивной силы. В среде QuickField проведены численные исследования параметров магнитного поля для следующих размеров магнитов: $K17 \times 8 \times 5$; $K16 \times 10 \times 5$; $K14 \times 8 \times 5$; $K12 \times 8 \times 3$; $K9 \times 5 \times 2,5$.

Для компенсации силы тяжести, действующей на чувствительный элемент, необходимо увеличить площадь нижнего статического магнита на 15-38% или его коэрцитивную силу на 7-32%.

Библиографический список

1. Сайкин М.С., Сплендер П.В. Магнитожидкостные датчики диагностики вибраций машиностроительных узлов энергетического оборудования электрических станций / Вестник Рыбинского государственного авиационно-технического университета имени П.А.Соловьёва. – Изд-во (РГАТУ имени П.А.Соловьёва), N 1 (72), 2025, С. 39-45.

*Д. В. Староверова, студ.;
рук. А. А. Ларькина, ст. преп.
(Кумертауский филиал ОГУ имени В. А. Бондаренко, г. Кумертау)*

ВАКУУМНЫЕ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ: ЭВОЛЮЦИЯ И ПРЕДЕЛЫ КОММУТАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ

В мировой электротехнической отрасли элегаз уступает место вакуумным аппаратам. Тенденция вызвана экологическими нормами, взрывобезопасностью и экономией.

ВДК герметично гасит дугу в вакууме. Состоит из корпуса, контактов CuCr, сильфона, экранов. После нуля тока прочность восстанавливается за счёт металлического пара, а не плазмы как в газе.

Первые вакуумные выключатели имели низкий ресурс из-за эрозии и несовершенства материалов. Эволюция включала повышение вакуума, создание контактов CuCr и магнитных систем для равномерного распределения эрозии. Современные ВДК основное решение для распределительных сетей, коммутируя 50–63 кА при 40,5 кВ.

Коммутационная способность ВДК зависит от плотности тока в зоне контакта, материала CuCr, геометрии и магнитных полей. Превышение плотности тока усиливает эрозию. Высокая скорость восстановления напряжения dU/dt вызывает повторное зажигание дуги и снижает надёжность.

ВДК имеют физические ограничения для учёта при проектировании. ПВН не более 3–5 кВ/мкс иначе повторный пробой. Эрозия 10–50 мкг/Кл, за 50 операций до 1 г. Ток среза 1–5 А вызывает перенапряжение 5–20 кВ, легирование CuCr снижает ток среза до 0,5–2 А. Выше критического тока дуга контрагируется с анодным пятном более 3000 °С, ускоряя износ.

Несмотря на пределы, исследования продолжаются. Повышение коммутационной способности достигается за счёт наноструктурированных материалов, новых геометрий контактов, комбинированных магнитных систем и моделирования дуги. Активно осваиваются классы напряжения 110 кВ и выше.

Из-за элегазовых ограничений вакуум стал главной альтернативой для энергетики при соблюдении ГОСТ.

Библиографический список

1. **Набатов К.А.** Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств : учебное пособие / К.А. Набатов, В.В. Афонин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с. – 75 экз. ISBN 978-5-8265-0961-6.

*Я. Н. Старостенков, студ.;
рук. В.А. Коваль, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)*

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛЕЙ НАНОАНТЕНН ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ SEI-СЛОЯ В ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРАХ

Литий-ионные аккумуляторы являются ключевым элементом энергетики, но их эксплуатация ограничена эффектом деградации.

Одним из главных факторов деградации является образование твёрдого электролитного интерфейса (SEI-слоя). Данный слой формируется на поверхности анода в результате взаимодействия электролита с активным материалом [1]. Постепенно SEI-слой утолщается, становится неоднородным и препятствует нормальному движению ионов лития, что приводит к росту внутреннего сопротивления, снижению ёмкости и уменьшению мощности аккумулятора.

Были разработаны компьютерные модели [2], в которых наноантенные структуры интегрируются в материал анода (рисунок 1).

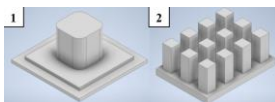


Рисунок 1. Модели наноантенн: 1 – «Барабан»; 2 – «Столбчатые наноантенны»

Результаты показали, что при наличии наноантенн температура внутри ячейки распределяется более равномерно, а скорость деградации SEI-слоя снижается. В лабораторных испытаниях было установлено, что использование наноантенн позволяет увеличить срок службы аккумулятора на 15–20 % по сравнению с существующими моделями. Наблюдается снижение внутреннего сопротивления и более стабильная работа при высоких нагрузках.

Библиографический список

1. Ярославцев, А. Б. Наноструктурированные материалы для низкотемпературных топливных элементов / А. Б. Ярославцев, Ю. А. Добровольский, Н. С. Шаглаева [и др.] // Успехи химии. – 2012. – Т. 81, № 3. – С. 191–220. – Текст : непосредственный.

2. Старостенков, Я. Н. Использование наноантенн в водородных солнечных батареях / Я. Н. Старостенков // Новые горизонты – 2024 : сборник материалов XI Белорусско-китайского молодежного инновационного форума, 21–22 ноября 2024 года / Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2024. – Т. 1. – С. 200–202. – URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/154912/200-202.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 01.03.2026).

*Я.А. Селюшкин, студ.;
рук. И.Ю. Долгих, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Электроконтактный нагрев является одним из способов реализации нагрева сопротивлением, широко используемым в промышленности для различных операций, связанных с тепловой обработкой металлических заготовок. В основе процесса лежит прямое пропускание тока в заготовке, подключаемой через контактный узел к понижающему трансформатору с несколькими ступенями напряжения. В этом случае нагрев осуществляется на переменном токе, в связи с чем в заготовке проявляется поверхностный эффект, что приводит к неравномерному распределению удельной плотности мощности внутренних источников тепла по сечению заготовки и влияет на характер её нагрева. Это обуславливает необходимость исследования электромагнитных процессов, связанных с распределением плотности тока и объёмной плотности мощности в заготовке. С этой целью целесообразна разработка численных моделей на базе стандартных прикладных программ, позволяющих решать поставленную задачу при корректном учёте физических свойств материала и особенностей геометрии моделируемых объектов.

При заданных значениях диаметра и длины цилиндрической заготовки решение задачи может быть получено в двумерной постановке в квазистационарном приближении через составляющую векторного магнитного потенциала, перпендикулярную к поперечному сечению заготовки. При этом исходными данными помимо параметров геометрии являются величина и частота тока в заготовке, а также физические свойства её материала (удельная электрическая проводимость и относительная магнитная проницаемость). Их значения зависят от температуры, но при решении электромагнитной задачи могут задаваться в виде констант, что будет соответствовать текущему значению температуры.

Разработанная таким образом модель позволила провести исследование электромагнитных процессов электроконтактного нагрева и определить основные его параметры. В то же время заложенные в модель принципы могут быть использованы в дальнейшем при совместном расчёте электромагнитных и тепловых процессов, что необходимо для учёта температурных зависимостей физических свойств материала заготовки.

*В.В Цыгина, студ.;
рук. Д.С. Рассказа, ст. преп.
филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске*

ОБОСНОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УМНОГО ДОМА ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

Современное жилое пространство активно трансформируется в автоматизированную среду, в которой ключевую роль играют микропроцессорные системы управления. Они обеспечивают контроль освещения, климатических условий, повышая комфорт и эффективность эксплуатации жилья.

Несмотря на широкое распространение технологий умного дома, при проектировании подобных систем важно учитывать не только технические возможности, но и реальные потребности пользователей. Многие производители делают акцент на энергосбережении и удалённом управлении, однако для создания конкурентоспособных решений необходимо определить наиболее востребованные функции.

С целью получения эмпирических данных было проведено анкетирование студентов в возрасте 18–25 лет. Результаты показали, что 53,7 % респондентов положительно относятся к внедрению систем умного дома, а 16,4 % проявляют высокий интерес.

Наиболее востребованными функциями являются автоматизация бытовых приборов, сценарная автоматизация и контроль энергопотребления. Также установлено, что одним из ключевых требований является наличие единого программного интерфейса для управления всеми устройствами.

Таким образом, результаты исследования позволяют сформулировать основные требования к архитектуре микропроцессорных систем умного дома: централизованное управление, энергоэффективность и высокий уровень информационной безопасности.

Библиографический список

1. **Результаты анкетирования студентов «Отношение к технологиям умного дома».**
URL <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSckJLiXjLEA3cMoIZ5WsdDTSbRs-rUi93fdnmkEVHKXWsl2Vw/viewform>

СЕКЦИЯ 16

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И
ПОДСТАНЦИЙ**

Председатель – к.т.н., доцент **Сулыненко И.Н.**,

Секретарь – старший преподаватель **Ушакова Н.В.**

*В.А. Аникеев, студ.;
рук. А.С. Страхов, к.т.н.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОБОРВАННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОБОТКИ РОТОРА НА СПЕКТР ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Обрыв одного или нескольких стержней короткозамкнутого ротора является одним из наиболее распространенных дефектов асинхронных двигателей. Данный дефект, в конечном счете, может привести к выходу двигателя из строя. Своевременная диагностика обрыва стержней является важной задачей для обеспечения надежного функционирования системы собственных нужд электрических станций.

Эффективным методом определения оборванных стержней является метод спектрального анализа тока статора. Известно, что повреждение обмотки ротора приводит к появлению в спектре гармоник от фиктивной обмотки ротора (ФОР) [1]. Однако в существующих работах мало внимания уделяется вопросам определения количества оборванных стержней. Целью работы является анализ влияния количества оборванных стержней на спектр тока статора асинхронного двигателя.

Исследования проводились на компьютерной модели асинхронного двигателя типа АИР71А6, разработанной в Ansys. Расчёты производились в режиме с номинальной нагрузкой при наличии 1 и 3 оборванных стержней, а также для исправной обмотки ротора. Обработка зарегистрированных сигналов выполняется в Matlab с использованием оконного преобразования Фурье (окно Флэттоп).

В результате анализа спектров определено, что при исправном состоянии обмотки ротора амплитуды гармоник ФОР практически равны 0, а при наличии обрывов стержней амплитуды этих гармоник достаточно велики для возможности обнаружения в спектрах. При наличии трех оборванных стержней значения амплитуд увеличились примерно в 5 раз, в то же время новых гармоник в спектре не возникло.

Таким образом, возрастание количества оборванных стержней приводит не к появлению новых гармонических составляющих спектре, а к увеличению амплитуд гармоник ФОР, поэтому, определяя амплитуды данных гармоник в спектре сигнала, можно также оценить и количество поврежденных стержней обмотки ротора.

Библиографический список

1. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

*В.А. Архипкин, студ.;
рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КЗ ОТ ГРУППЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИК НАЦИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА И СТАНДАРТА МЭК

Целью работы является выявление основных сходств и отличий между расчетами токов КЗ от группы электродвигателей собственных нужд методиками национального стандарта и методикой МЭК, выявление наиболее точного подхода к расчету.

Стандарты МЭК носят рекомендательный характер, и страны-члены МЭК имеют полную независимость в вопросах их применения на национальном уровне; однако они приобретают обязательный характер в случае выхода продукции на мировой рынок.

В связи с этим страны-члены МЭК решают вопросы использования одобренного ими международного стандарта по-разному:

- принимают стандарт МЭК в качестве национального с аутентичным переводом на национальный язык;
- разрабатывают национальные стандарты по тем же проблемам с учетом сложившихся традиций, накопленного опыта. Национальный стандарт должен отвечать принципам соответствия стандартам МЭК.

Наибольший интерес представляет сравнение национального стандарта [1] и стандарта МЭК [2]. МЭК предлагает при расчетах токов подпитки разделять группу АД, подключенных к секции с повреждением, на две подгруппы: подгруппу А, включающую в свой состав двигатели с мощностью на пару полюсов более 1 МВт, и подгруппу Б с двигателями мощностью на пару полюсов менее 1 МВт. МЭК, например, предлагает для подгруппы двигателей А при определении ударного тока КЗ использовать значение ударного коэффициента, равного 1,75. Проблема имеет значение при расчетах ТКЗ в системе собственных нужд мощных блоков ТЭС и АЭС.

В работе представлены сравнительные расчеты и рекомендации по использованию различных методик.

Библиографический список

1. **ГОСТ Р 52735-2007.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Ростехрегулирование, 2007.
2. **CEI 60909-0: 2001** (Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif. Partie 0: Calcul des courants).

Н.Е. Бардюков, студ.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, Иваново)

НОВЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В настоящее время значительная часть основных электрических устройств и оборудования выработала свой нормативный срок службы. Это относится и к силовым трансформаторам.

Чтобы контролировать состояние трансформаторов и автотрансформаторов требуется проводить измерение и мониторинг трансформаторного масла. При анализе данной жидкости мы можем определить состояние изоляции трансформатора, наличие загрязнения, влаги и различных газов.

Основная проблема в данный момент – это отсутствие регулярного мониторинга состояния трансформаторов. Также присутствует использование устаревших или неэффективных систем мониторинга. Поэтому нужно разработать малогабаритный газоанализатор, который даст нам возможность собирать пробы трансформаторного масла каждые 4-8 часов.

В данный момент разработана новая методика оценки трансформаторного масла, которая позволит более оптимально анализировать состояние трансформатора.

Следующим шагом будет интеграция методики в модернизационный проект подстанции, что позволит продлить срок службы маслонаполненных трансформаторов.

Технологии мониторинга и диагностики развиваются, и отсутствие внедрения новых методов может привести к отставанию в обеспечении надежности. Именно поэтому нужно исследовать этот вопрос и найти оптимальное решение данных проблем. Развитие данного направления более подробно и рассматривается в докладе.

Библиографический список

1. **Савельев В.А.**, Львов С.Ю., Львов Ю.Н., Егоров С.А. «Технологические принципы мониторинга силовых трансформаторов» сборник НБСЭ ,Казань.
2. **О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ при эксплуатации** / Б.В. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львова и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. - С. 53-58.

*В.А.Вахонина, студ., С.Н.Литвинов, асп.;
рук. А.А.Скоробогатов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г.Иваново)*

РАЗРАБОТКА СПОСОБА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ, ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цифровой измерительный трансформатор – это высоковольтное устройство, которое преобразует первичные величины тока и напряжения в цифровой сигнал [1]. Он обладает некоторыми преимуществами перед классическими трансформаторами и лишены многих недостатков. Однако, как и классические трансформаторы, подвержен дефектам. С помощью контроля технического состояния дефекты в элементах конструкции можно обнаружить на ранней стадии развития. Авторский коллектив ставит в работе цель – создание эффективного способа контроля и диагностики состояния изоляции ЦИТ по характеристикам частичных разрядов.

Суть способа заключается в непрерывном мониторинге частичных разрядов, возникающих в дефектных зонах внутренней полимерной изоляции. С помощью двух индуктивных датчиков можно сформировать мостовую схему регистрации разрядов. В качестве соединительного конденсатора используется электродная система и изоляция самого трансформатора. Полезный сигнал выделяется на фоне помех и вычисляются ключевые параметры. Они сравниваются с пороговыми значениями и делается вывод о техническом состоянии изоляции.

Для проверки работоспособности способа, проведены исследования на макете, в котором смоделированы дефекты изоляции. Исследовались различные схемы включения индуктивных датчиков для регистрации импульсных токов ЧР. Выявлено, что мостовая схема с двумя датчиками эффективно выделяет полезный сигнал на фоне помех. Для верификации результатов параллельно использовалась эталонная измерительная система МРД600.

Предложенный способ позволяет надежно выделять разряды внутри изоляции на фоне внешних помех и выявлять развивающиеся дефекты изоляции на ранней стадии, что повышает надежность и безопасность эксплуатации цифровых трансформаторов.

Библиографический список

1. Хренников А., Галиев И., Скрыдлов Е. Цифровые трансформаторы тока. Устройства для вычисления силы тока // *Новости электротехники*, № 6(96), 2015.

*Д.А. Вейсман, студ;
рук. Е.М. Новоселов, к.т.н,
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСБАЛАНСА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Механические повреждения относятся к числу распространенных причин выхода из строя асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций. Дисбаланс ротора приводит к росту вибрационных нагрузок на подшипниковые узлы, их ускоренному износу и, как следствие, к незапланированным остановам оборудования. Традиционно данный вид дефектов выявляется с помощью методов и средств виброакустической диагностики [1].

Целью данной работы является усовершенствование существующего экспериментального стенда, чтобы получить возможность физического моделирования дисбаланса ротора и исследовать проявления данного дефекта в токе статора, внешнем и внутреннем магнитных полях.

Существующий экспериментальный стенд состоит из исследуемого асинхронного двигателя АИР71А6, мощностью 370 Вт с которым на одном валу находится АД типа 5АИ71В6 мощностью 550 Вт, который выступает в качестве нагрузки. Электродвигатели могут получать питание от лабораторного автотрансформатора и двух преобразователей частоты, что позволяет создавать разнообразные условия работы двигателей.

Контролируемый дисбаланс предполагается создать путем установки между двигателями маховика с отверстиями, в которых могут устанавливаться калиброванные грузы. В ходе опытов предполагается ступенчатое изменение величины дисбаланса в пределах, соответствующих нормам ГОСТ ИСО 1940-1-2007 и превышающих их [2].

В рамках дальнейшей работы планируется обработка и спектральный анализ, сигналов тока статора, внешнего и внутреннего магнитных полей. Ожидается установление количественной зависимости между массой груза и амплитудой вибрации на оборотной частоте

Библиографический список

1. **Русов, В. А.** Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – Пермь, 2012. – 200 с.
2. **ГОСТ ИСО 1940-1-2007.** Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. – М.: Стандартинформ, 2008.

Д.М. Голубев, асп.;
рук. В.В. Елистратов, д.т.н., проф.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ НА ПЛАВАЮЩИХ ПЛАТФОРМАХ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ ВЕТРОПАРКОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Актуальность темы обусловлена задачами энергетической стратегии Российской Федерации до 2050 года по цифровизации ТЭК и развитию энергетики в Арктике. Глубоководные ветропарки Баренцева моря (глубины более 60 – 400 м) требуют размещения цифровых подстанций на плавающих платформах, что существенно влияет на их конструктивные решения и режимы работы [1].

Цель работы – провести сравнительный анализ конструкций цифровых подстанций на плавающих платформах и выявить наиболее перспективные решения для условий Баренцева моря.

В работе выполнен сравнительный анализ двух основных концепций: полупогружных платформ с горизонтальной открытой палубой и альтернативных решений. Рассмотрены параметры: вес надводного строения, центр тяжести, условия охлаждения оборудования, интеграция МЭК 61850, ледостойкость и стоимость.

Показано, что концепция с горизонтальной открытой палубой обеспечивает лучшие условия естественного охлаждения и снижение веса на 30 – 40%, однако требует дополнительных мер по ледозащите. Выявлены преимущества и недостатки каждой конструкции с точки зрения режимов работы цифровой подстанции и интеграции переменной генерации ветропарка [2].

Выводы. Проведённый сравнительный анализ позволяет рекомендовать наиболее рациональные конструктивные решения цифровых подстанций на плавающих платформах для глубоководных ветропарков Баренцева моря, что способствует технологическому суверенитету и эффективному развитию морской ветроэнергетики в Арктике.

Библиографический список

1. **Распоряжение** Правительства РФ №908-р от 12.04.2025 «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года».
2. **DNV**. Floating Offshore Wind Substations: Joint Industry Project. – 2024.

Д.М. Голубев, асп.;
рук. В.В. Елистратов, д.т.н., проф.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ПЛАВАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЕ ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ МОРСКИХ ВЕТРОПАРКОВ

Рост единичной мощности морских ветровых турбин до 26 МВт приводит к тому, что традиционные монопили достигают пределов по размеру, весу и возможностям монтажа. В глубоководных акваториях Баренцева моря (глубины более 100 метров) неизбежен полный переход на плавающие платформы как для турбин, так и для подстанций. Это требует нового подхода к электрооборудованию и режимам его работы в условиях динамических морских нагрузок [1].

Цель работы сравнительный анализ нормального, переходного и аварийного режимов цифровой подстанции на плавающей платформе с учетом влияния качки, динамических высоковольтных кабелей и требований стандарта МЭК 61850.

В нормальном режиме основными вызовами является вибрации платформы (ускорения до 0,5 – 1 g и наклоны до 5 – 10°), которые влияют на точность цифровых значений (SV) и синхронизацию по протоколу РТР. Переходные режимы характеризуются резкими изменениями генерации из – за порывов ветра и волнения; здесь критически важна быстрая реакция алгоритмов защиты на основе GOOSE – сообщений. В аварийных режимах (короткие замыкания, обрыв динамического экспортного кабеля) на первый план выходит устойчивость цифровой защиты к гармоникам и резонансным явлениям в длинных кабельных линиях.

Анализ данных показывает, что применение новых материалов в динамических высоковольтных кабелях (арамидные и полиэтиленовые волокна вместо стальной брони) значительно повышает усталостную прочность. Исследования подтверждают, что правильно настроенная цифровая подстанция на плавающей платформе способна сохранять стабильность релейной защиты и автоматизации даже при интенсивной качке [2].

Библиографический список

1. **DNV.** Floating Offshore Wind Substations: Joint Industry Project. – 2024.
2. **Tsylin A., Muthiah S.** Digital substations in floating offshore wind farms // PAC World Magazine. 2024 – 2025.

*Д.А. Ежов студ.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Анализ повреждаемости трансформаторного оборудования на электростанциях и в сетях России и за рубежом за последние 20 показал, что отказы силовых трансформаторов составляют 7,2%, блочных – 7%, измерительных трансформаторов тока и напряжения – 4% и 7% соответственно, а повреждения по узлам силовых трансформаторов: РПН – 40%, обмотки – 20%, высоковольтные вводы – 13%, магнитопробод- 10%.

В процессе развития дефектов трансформаторы генерируют большие массивы данных (нагрузка, температура, напряжение, концентрации растворённых газов, частичные разряды и др.). Это вызывает интерес использовать для диагностирования нейронных сетей. делает возможным применение ИНС для обработки этой информации в реальном времени., поэтому в работе рассматриваются возможности применения нейронных сетей для их диагностирования.

С этой целью разработан программный модуль на языке Python, реализующий классификацию дефектов на основе газовых соотношений (C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6) и мощности трансформатора. Модуль включает функции анализа превышений предельно допустимых концентраций, построения динамики газов и диаграммы Дюваля, предусмотрен ручной ввод данных и загрузка из CSV/Excel и определены наиболее значимые признаки для диагностирования. Полученная модель способна к самообучению на базе новых данных и прогнозировать процесс развития дефектов. Показано, что для раннего выявления дефектов необходимо сочетание ХАРГ с контролем частичных разрядов, влажности и загрязнения масла.

Библиографический список

1. **В.А.Савельев**, Д.А.Ежов Определение аварийного режима силовых маслонаполненных трансформаторов средствами контроля с искусственной нейронной сетью, тезисы доклада на международном научном семинаре «Перспективные направления развития энергетической безопасности ядерных и радиационных технологий» 20-22 мая 2025 г., Минск, Республика Беларусь.
2. **В.А .Савельев**, Д.А.Ежов, Н.Е.Бардюков Комплексная оценка технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов. Условия и перспективы.

*Д.О. Еришов, студ.;
рук. А. А. Скоробогатов, к. т. н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТОТНО- ВРЕМЕННЫХ ДИАГРАММ

Асинхронные электродвигатели (АД) широко применяются на электростанциях в качестве приводов для рабочих машин (РМ) собственных нужд. В процессе эксплуатации возникает как ухудшение характеристик РМ и АД из-за износа, так и ухудшения характеристик, вызванных повреждением внутри агрегата. Одной из распространённых причин выхода из строя АД является обрыв стержня обмотки ротора.

На ранних стадиях такое повреждение является не опасным и слабо сказывается на характеристиках АД и РМ и может долгое время оставаться незаметным для существующих средств диагностики. Но прогрессирующий характер дефекта может привести к значительного ущербу в дальнейшем. Своевременная диагностика двигателя может не только установить наличие повреждения, но и уберечь от дальнейшей аварии.

Предлагаемым решением является разработка средств диагностики на основе анализа частотно-временного спектра тока статора, который указывает на наличие неисправностей в конструкции АД при возникновении определенных гармоник [1]. Для реализации данного решения была разработана тестовые модели полностью исправного АД и АД с повреждением в обмотке ротора.

Следующими шагами будут: проведение испытаний на различных имитационных моделях исправных и поврежденных АД и анализ спектра тока статора для выявления закономерностей и уровней сигналов, характеризующих неисправность.

Это позволит разработать новый способ диагностики для обнаружения неисправностей АД на основе анализа частотно-временных спектров и методике задания уставок для данных защит.

Библиографический список

1. Назарычев А. Н. и др. Метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора // Дефектоскопия. – 2020. – №. 8. – С. 49-55.

К.С. Ковалева, студ.;
рук. В.В. Жуков, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

КООРДИНАЦИЯ УРОВНЕЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА НА БАЗЕ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ И ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В настоящее время актуальна проблема электроснабжения удаленных и изолированных районов Крайнего Севера, которая может быть эффективно решена созданием энергокомплексов. Объединение электростанций разного типа в энергокомплексы с последующим их развитием приводит к росту уровней токов КЗ. Это создает проблему координации – оптимального согласования параметров электрооборудования с существующими и перспективными уровнями токов КЗ.

Разработан проект электрической части энергокомплекса из энергоблока с реакторной установкой РИТМ-200Н мощностью 55 МВт (ввод в эксплуатацию – 2028 г., Усть-Янский район, Якутия), а также шесть газотурбинных электростанций ГТЭС-25 ПА мощностью по 25 МВт каждая производства АО «ОДК-Авиадвигатель» [1].

Для расчета токов КЗ в цепях энергокомплекса использован ПК «NEPLAN». Определены начальное действующее значение периодической составляющей ($I_{п0}$) и ударный ток ($i_{уд}$). Например, в энергокомплексе из ГТЭС-25ПА при КЗ на шинах 10 кВ: $I_{п0}=31,234$ кА, $i_{уд}=81,294$ кА; при подключении РИТМ-200Н – $I_{п0}=37,351$ кА, $i_{уд}=97,884$ кА. В результате электрооборудование ГТЭС-25ПА при подключении РИТМ-200Н не соответствовало нормативным требованиям.

Таким образом, практическая ценность исследования заключается в обосновании замены оборудования или методов токоограничения, а перспективы – в разработке рекомендаций по выбору электрооборудования для поэтапного ввода генерации.

Биографический список

1. Сулимов Д.Д., Капралов Д.А. Крупнейшая ТЭС на базе российских ГТЭС-25ПА введена в Перми // Турбины и Дизели. – 2015. – № 6 – С. 4–7.

*А.А. Лопухов, студ.; С.Н. Литвинов, асп.;
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цифровые измерительные трансформаторы (ЦТ) – это современные устройства для измерения высоких напряжений и токов в электрических сетях. Главным отличием от классических трансформаторов является преобразование измеряемых параметров в цифровой сигнал. Применение ЦТ повышает управляемость подстанцией, обеспечивает безопасность обслуживания вторичных систем. Но отсутствие опыта эксплуатации и показателей надёжности замедляет их внедрение. Целью работы является создание способа определения технического состояния узлов трансформатора по допустимой температуре нагрева.

Предложен способ, при котором трансформатор дополнительно оснащается цифровыми датчиками температуры, размещёнными в контрольных точках. В процессе работы, регистрируемые датчиками значения температуры, поступают в контроллер обработки сигнала, где сравниваются с допустимыми. При превышении значения уставки перегрева формируется сигнальное диагностическое сообщение; при превышении уставки критической температуры – сообщение на отключение ЦТ.

Критерии перехода ЦТ в неработоспособное состояние определялись экспериментально на макетах. В ходе исследования в климатической камере моделировались два режима: нормальный ($U_{НОМ}=5,77$ кВ) и аварийный ($U_{АВ}=12,1$ кВ). Результаты термографии показали, что максимальный нагрев поверхности резистивного делителя в центральной части достигает 109 °С, а с учетом инсоляции в аварийном режиме возрастает до 130 °С. Анализ температурных зависимостей, выявил следующее: в нормальном режиме за 3 часа нагрев резистора составил 56 °С без инсоляции и 74 °С с инсоляцией, а в аварийном режиме за 2,2 часа нагрев резистора составил 108 °С без инсоляции и 123 °С с инсоляцией. Дополнительно проведён эксперимент по определению предельного напряжения, при котором разрушается высоковольтный резистор.

В результате исследований экспериментально подтверждено, что уровень напряжения и инсоляция критически влияют на тепловое состояние ЦТ, причем в аварийных режимах нагрев может привести к разрушению элементов. Разработанный способ позволяет своевременно выявлять перегрев узлов, классифицировать его причины и предотвращать аварийные отключения оборудования.

В.А. Меньшов, асп.;
рук. В.Ф. Лачугин, д.т.н., проф.
(МЭИ, г. Москва)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЕЁ РАБОТЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Актуальность проблемы обусловлена растущим в последние годы вниманием к литий-ионным системам накопления электроэнергии (СНЭ), сопровождающим распространение генерации на базе возобновляемых источников энергии [1]. Анализ существующих методик моделирования работы СНЭ в составе электроэнергетических систем (ЭЭС) выявил нехватку работ, учитывающих непосредственно физико-технические свойства аккумуляторов [2]. *Новизна* исследования заключается в экспериментальном установлении характеристик литий-ионных аккумуляторов СНЭ, важных для их интеграции и функционирования в ЭЭС. *Практическая ценность* состоит в обеспечении пожаровзрывобезопасности работы СНЭ, а также оптимизации их режима по критерию увеличения срока их службы. *Личный вклад автора* заключается в выявлении проблемы, постановке цели и задач исследования, разработке программы испытаний и активном участии в них, обработке и анализе результатов экспериментов, подготовке на их основе рекомендаций по применению СНЭ. *Перспективы использования полученных результатов* — уточнение допустимых режимов работы СНЭ с расширением сферы их применения, в частности, для привлечения СНЭ к аварийному электроснабжению ответственных потребителей.

В ходе лабораторных испытаний различных литий-ионных аккумуляторов установлен их нагрев в зависимости от токов разряда. Показано, что работа СНЭ на относительно высоких токах (1С и выше) вызывает нагрев аккумуляторов, значительно растущий с увеличением разрядного тока и способный впоследствии привести к возгоранию и взрыву накопителя. Кроме того, исследовано влияние режима СНЭ на срок её службы. Установлено, что работа на значительных токах может существенно сократить ресурс СНЭ. Также произведена оценка экономической эффективности внедрения СНЭ для выполнения её различных задач.

Библиографический список

1. **Павлов А.С.** Развитие систем накопления энергии в мире: от концепций до проектов // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2020. — № 2 (59). — С. 12–17.
2. **Обзор** математических моделей систем накопления энергии для моделирования электроэнергетических систем. Часть 1 / И.А. Разживин, А.А. Суворов, М.В. Андреев и др. // Изв. РАН. Энергетика. — 2023. — № 2. — С. 58–80.

А.Н. Микин, студ.;
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АЭС ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБМОТКЕ РОТОРА

Асинхронные электродвигатели широко применяются в системах собственных нужд атомных электростанций (АЭС), обеспечивая работу насосов, вентиляторов, систем охлаждения и других критически важных механизмов. Надёжность АД напрямую влияет на безопасность и устойчивость функционирования энергоблока.

Целью исследований является выделение диагностического признака наличия повреждений обмотки ротора АД по току статора.

Повреждения обмотки ротора (например, обрывы стержней короткозамкнутой обмотки ротора) относятся к скрытым дефектам, которые на ранних стадиях практически не проявляются. В то же время их развитие может привести к снижению КПД, перегреву, вибрациям и, в конечном итоге, к аварийным остановам оборудования.

Предлагаемое исследование направлено на повышение надёжности и безопасности эксплуатации асинхронных электродвигателей АЭС за счёт разработки эффективных методов ранней диагностики повреждений ротора. Решение поставленных задач позволит снизить риск аварийных ситуаций, оптимизировать техническое обслуживание и продлить срок службы оборудования.

К.Д. Минаев, студ.;
Рук. И.О. Шифрин, ст. преп.
(ПКИТ МГУТУ, г. Пенза)

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПО ДАНЫМ МОНИТОРИНГА ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТАЦИОННЫХ ЦИКЛОВ

Переход к обслуживанию по фактическому состоянию требует непрерывного контроля временных характеристик высоковольтных выключателей в циклах «включение–отключение». Анализ осциллограмм тока электромагнитов и кривых движения контактов позволяет выявить дефекты привода и дугогасительной камеры без вывода аппарата из работы [1]. Основные диагностируемые параметры и их связь с типовыми неисправностями приведены в таблице 1.

Таблица 1– Диагностические параметры выключателя и характерные дефекты

Параметр	Контролируемая величина	Выявляемый дефект
Время трогания	Ток электромагнита	Затирание в механизме, неисправность катушки
Полное время включения	Ход контактов	Ослабление пружин, износ подшпиков
Скорость движения траверсы	Вибрация, кривая хода	Деградация дугогасительной камеры

Библиографический список

1. СТО 70238424.17.220.20.008-2011. Системы и устройства диагностики состояния оборудования подстанций и ЛЭП. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. – М.: НП «ИНВЭЛ», 2011. – 64 с.

А.П. Овчарук, К.А. Попов, студ.;
рук. Н.Н. Смотров, к.т.н., доц.
(НИУ МЭИ, г. Москва)

ВЛИЯНИЕ ТОКООГРАНИЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНВЕРТОРОВ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

На объектах электроэнергетики широко распространены инверторные установки. Такое оборудование является ключевым для подключения возобновляемых источников энергии, а также питания особо ответственных потребителей собственных нужд.

Подавляющее большинство современных инверторов построено на базе IGBT-модулей [1]. Ключевая особенность таких устройств — это реализация алгоритмов токоограничения для защиты самих полупроводниковых ключей от перегрузок по току. При возникновении короткого замыкания (КЗ) система управления инвертора мгновенно ограничивает амплитуду тока на уровне 120-300% от номинального значения. Работа инвертора в этом режиме неизбежно сопровождается «срезом» синусоиды и появлением нечетных гармоник высших порядков.

Целью данной работы является определение условий, при которых защитные аппараты теряют чувствительность, и количественная оценка степени снижения их чувствительности. Для вспомогательного расчета гармоник и графического отображения «срезанной» синусоиды была разработана программа на языке Python. Также была смоделирована и проанализирована математическая модель оценки коэффициента чувствительности. В качестве защитных аппаратов были рассмотрены автоматические выключатели различного номинала с характеристикой C. Обработка результатов расчета произведена с использованием программного комплекса Microsoft Excel.

Результаты исследования показали, что наиболее тяжелые условия возникли при удаленных КЗ, когда коэффициент чувствительности значительно падал, доходя до нормативных значений 1,2-1,5. Суммарный вклад гармоник повышал фактический ток срабатывания защит, что привело к уменьшению коэффициента и утрате чувствительности защитного оборудования. У каждого рассмотренного автоматического выключателя свои участки сети, где ток КЗ из-за токоограничения инвертора не превышал ток срабатывания электромагнитного расцепителя.

Библиографический список

1. **Zhou J.** All You Need to Know About Using IGBTs [Электронный ресурс] // Power Systems Design. – 2023. – 10 Jan. – URL: <https://powersystemsdesign.com/articles/all-you-need-to-know-about-using-igbts/154/20603>.

*В. О. Олейник студ.;
рук. В. А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАБОТУ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Надежная работа трансформаторов зависит от многих факторов: от характера питаемой электрической нагрузки, качества электрической энергии, температуры внешней среды и других факторов. Показатели качества можно разделить на 2 категории: продолжительные изменения характеристик и случайные события. К продолжительным относятся отклонения частоты, медленные изменения и колебания, несинусоидальность и несимметрия напряжения в 3-х фазных сетях. К случайным относятся прерывания, провалы и импульсные напряжения. Эти факторы сильно проявляются на трансформаторах тяговых подстанций. Специфика их режимов проявляется в искажении синусоидальности переменного напряжения. Это объясняется тем, что электровоз является однофазной нагрузкой. Физическая сущность искажения синусоидальности заключается в возникновении режима КЗ цепи обмоток трансформатора в интервалы коммутации токов вентилей выпрямителей электровоза в режиме тяги или инвертора в режиме рекуперативного торможения В докладе показано, что искажения качества электроэнергии приводят к дополнительному нагреву изоляции трансформатора и к снижению ее срока службы. Искажения КЭ на уровне предельно допустимых ГОСТом 13109-97 значений при низком коэффициенте загрузки трансформатора не приводят к увеличению температуры изоляции выше допустимой. Относительно небольшие искажения КЭ при полной загрузке трансформатора уже приводят к превышению допустимой температуры. Граничными параметрами являются: коэффициент загрузки равный 0,7, рекомендованный ПТЭ, и величина искажений на уровне предельно допустимых ГОСТом 13109-97 значений. Увеличение любого из них приводит к снижению срока службы изоляции и надежности работы трансформатора.

Библиографический список

1. **Валянский, А. В.** Влияние качества электроэнергии на надежность силового трансформатора / А. В. Валянский, И. И. Карташев, Ю. В. Шаров. // Электротехника. - 2014. - № 3. - С. 20-27.

А.С. Почтаев, студ.;
рук. А.С. Страхов, к.т.н.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗНЫХ ВИДАХ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА

Эксцентриситет асинхронного электродвигателя является распространенным видом дефектов, которые могут возникать в процессе эксплуатации и приводить к отказу. Отказ электродвигателя влечёт не только дорогостоящий ремонт или его замену, но и риск нарушения технологического процесса, например, частичный или полный останов блока электрической станции.

Одним из перспективных методов обнаружения повышенного эксцентриситета является метод спектрального анализа внешнего магнитного поля и тока статора. В проведенных ранее исследованиях были показаны характерные признаки динамического эксцентриситета [1] и статического эксцентриситета [2]. Однако в ходе анализа было обнаружено, что частоты гармоник, наиболее ярко проявляющихся в диагностических сигналах, для указанных видов эксцентриситета совпадают. Поэтому необходимо определить, возможно ли различать виды эксцентриситета по спектрам диагностических сигналов или можно сделать вывод лишь о его наличии.

Для проведения исследований разработаны модели двух асинхронных двигателей в программном комплексе Ansys: 4A132S4У3 мощностью 7,5 кВт с двумя парами полюсов и АИР71А6 мощностью 370 Вт с тремя парами полюсов. Для каждого двигателя исследуются четыре состояния: статический (смещение ротора на 30 % от величины воздушного зазора), динамический (30 %) и комбинированный эксцентриситеты, а также исправный двигатель без повреждений.

В рамках дальнейших исследований планируется провести анализ спектров и их сравнение при наличии разных типов эксцентриситета, а также оценить их изменение при различной степени дефектов.

Библиографический список

1. **Власов М. В.** Выявление повышенного динамического эксцентриситета на основе анализа спектров сигналов асинхронных двигателей // Электроэнергетика: материалы XIX Всерос. (XI Междунар.) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2024». – Т. 3. – Иваново, 2024. – С. 93.

2. **Рождественский П. А.,** Рождественская Е. А., Страхов А. С. Обнаружение статического эксцентриситета асинхронных двигателей методом спектрального анализа в различных режимах // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXIII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Т. 1. – Иваново, 2025. – С. 86–89.

*А.Ю. Савченко, студ.;
рук. А.О. Добродей, к.т.н., доц.
(ГГТУ им. П.О. Сухого, г. Гомель)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ NI MULTISIM ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТИ 6 КВ

В настоящее время в Республике Беларусь электрические сети напряжением 6-35 кВ эксплуатируются с различными режимами нейтрали: изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль (нейтраль, заземленная через дугогасящий реактор), резистивно-заземленная нейтраль.

Основным достоинством данных сетей является высокая степень надежности электроснабжения потребителей при однофазном замыкании на землю. Но слабая электрическая связь этих сетей с нулевым потенциалом земли неизбежно приводит к возникновению в сети значительных перенапряжений.

Высокая аварийность электрических сетей напряжением 6–35 кВ обуславливает актуальность задачи повышения надежности электроснабжения потребителей.

В данной работе выполнено компьютерное моделирование [1] перенапряжений в сети 6 кВ при однофазном замыкании на землю в программном комплексе NI Multisim [2]. По результатам моделирования получены осциллограммы переходных процессов при развитии перенапряжений, а также рассчитаны кратности перенапряжений при различных режимах работы нейтрали сети (рис. 1).

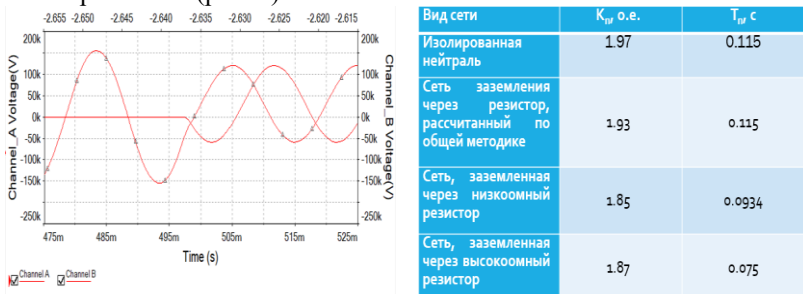


Рисунок 1. Осциллограмма перенапряжений для замыкания фазы С на землю и результаты расчета коэффициентов перенапряжений при различных режимах нейтрали

Библиографический список

1. **Хернтер М.Е.** Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. — М.: ДМК-пресс, 2007. — 488 с.
2. **Гололобов В.Н.** Схемотехника с программой Multisim для любознательных. — Санкт-Петербург: Наука и техника, 2019. — 273 с.

К.О. Сарычев, студ.;
рук. А.С. Страхов, к.т.н.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОВЫШЕННОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА ТОКА СТАТОРА

Повышенный эксцентриситет ротора синхронных турбогенераторов является одной из распространенных причин вибрации, задевания ротора о статор и последующих аварийных отключений. Традиционные методы контроля требуют установки дополнительных датчиков или остановки агрегата. Актуальной задачей является разработка метода бесконтактной диагностики по уже существующим сигналам – токам статора.

В разработанной имитационной модели турбогенератора ТВФ-60-2 в программном комплексе Ansys были смоделированы повышенные эксцентриситеты ротора (статический и динамический) в 10, 20 и 30% от величины воздушного зазора. Далее были построены спектры сигналов токов статора в диапазоне от 0 до 500 Гц в программном комплексе Matlab методом оконного преобразования Фурье.

При статическом эксцентриситете (30%) в 2 раза повысилась амплитуда постоянной составляющей, амплитуды гармоник, кратных 50 Гц (100, 150, ... 400 Гц) увеличились в десятки раз. При динамическом эксцентриситете (30%) повысилась амплитуда только гармоника 350 Гц на 40 %. По полученным результатам анализа спектров тока статора турбогенератора в области частот от 0 до 500 Гц выделены диагностические признаки статического эксцентриситета, заключающиеся в резком повышении амплитуд нулевой, третьей и четных гармоник в сигнале тока статора турбогенератора. Влияние динамического эксцентриситета на спектр тока мало, явного диагностического признака наличия данного повреждения выявить не удалось.

Для подтверждения возможности выявления ранее указанных гармоник на реальных турбогенераторах был произведен анализ сигналов тока статора турбогенераторов типа ТЗВ-1200-2АУЗ, полученных на Нововоронежской АЭС. Для возможности их дальнейшей обработки в программе Transcor сигналы были преобразованы в формат .dat. В ходе анализа спектров тока статора были обнаружены перечисленные гармонические составляющие, в результате чего подтверждена возможность проведения диагностирования в условиях эксплуатации.

Таким образом, в рамках проведенных исследований была доказана возможность обнаружения повышенного эксцентриситета на основе анализа спектров тока статора турбогенераторов.

Г. Д. Смирнов, асп.;
рук. А. А. Скоробогатов, к. т. н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ

Высоковольтные синхронные электродвигатели (СД) применяются для привода механизмов в электроэнергетических и технологических комплексах. Одной из причин их выхода из строя является обрыв стержней демпферной обмотки ротора, обеспечивающей асинхронный пуск.

Выявление ранних повреждений стержней затруднено: в установившемся синхронном режиме токи в них практически отсутствуют. Развитие дефекта, сопровождающееся электромагнитной несимметрией, проявляется исключительно на этапе переходного процесса (пуска), что требует разработки методов контроля состояния обмотки по току статора.

Основой для разработки методов диагностики является получение достоверных осциллограмм пусковых режимов. С этой целью в программном комплексе Ansys Maxwell разработана имитационная модель мощного явнополюсного СД. При проектировании учтены конструктивные особенности статора и ротора, кривые намагничивания магнитопровода, момент инерции ротора, вентиляторная нагрузка, а также алгоритм задержки подачи тока возбуждения для корректного втягивания ротора в синхронизм.

На базе разработанной модели проведена серия имитационных экспериментов. Выполнены симуляции пуска для исправного двигателя и модели с введенной неисправностью (оборванными стержнями). Получены массивы значений пусковых токов статора для обоих состояний агрегата.

Следующим этапом исследования станет разработка алгоритма с использованием программного комплекса Matlab. Запланирована обработка полученных токовых сигналов методами оконного преобразования Фурье для построения частотно-временных спектров. Данный подход позволит отследить динамику изменения боковых дефектных гармоник по мере разгона ротора и выявить диагностические признаки неисправного состояния демпферной обмотки ротора.

А.Д. Суляев, студ.;
рук. Е.М. Новоселов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМКНУТЫХ В ОБМОТКЕ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Межвитковые замыкания являются одной из наиболее распространенных причин отказов асинхронных электродвигателей. Данный дефект приводит к значительным повреждениям электрических машин, поэтому важно своевременно его обнаружить.

При разработке новых методов функциональной диагностики межвитковых замыканий необходимо тем или иным способом имитировать дефект, чтобы выявить характерные закономерности, которые его сопровождают. Для решения этой задачи разработан экспериментальный стенд, состоящий из трех функциональных частей: физической, управляющей и измерительной. Физическая часть включает в себя исследуемый асинхронный двигатель АИР71А6 мощностью 370 Вт, размещенный на одном валу с двигателем, выступающим в роли нагрузки. Обмотка статора исследуемого двигателя может находиться в трех состояниях:

1. исправное;
2. с одним замкнутым витком;
3. с тремя замкнутыми витками.

Управляющая часть представляет собой шкаф управления, трехфазный лабораторный автотрансформатор и два частотных преобразователя.

Измерительная часть состоит из блока трансформаторов тока и напряжения, токовых шунтов, инкрементального энкодера, микропроцессорного терминала релейной защиты АПС МИР 100 и аналого-цифрового преобразователя L-CARD E14-440.

Для выявления неисправности предполагается использовать спектральный анализ тока статора и внешнего магнитного поля [1].

Библиографический список

1. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя.

*А.Р. Чирков, студ.,
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время асинхронные двигатели (АД) занимают доминирующее положение среди электрических машин, что обуславливает высокую актуальность задач мониторинга их технического состояния. Одним из наиболее распространённых дефектов АД является межвитковое короткое замыкание в обмотке статора. Существующие методы диагностики данного типа повреждений характеризуются недостаточной чувствительностью при малом количестве замкнутых витков.

Целью исследований является идентификация диагностического признака межвитковых замыканий обмотки статора АД на основе анализа тока статора.

Исследование проводилось на основе модели АД, построенной в программном комплексе Ansys. Полученные данные обрабатывались методом, который базируется на анализе спектральных характеристик гармонических составляющих токов электродвигателя. Сущность подхода заключается в регистрации фазных токов АД и их последующем спектральном анализе с применением оконного преобразования Фурье FFT (Short-Time Fourier Transform).

Спектральный анализ тока статора показал, что, помимо зубцовых гармоник, наблюдается рост амплитуды составляющей с частотой 150 Гц [1]. В ходе исследования установлено, что амплитуда этой гармоники возрастает прямо пропорционально доле замкнутых витков в повреждённой фазе статорной обмотки. При отсутствии повреждений гармоника на 150 Гц не возникает. Амплитуды зубцовых гармоник также увеличиваются по мере роста числа короткозамкнутых витков в повреждённой фазе. Анализ величины тока в замкнутых витках показал, что при увеличении процентного содержания короткозамкнутых витков ток через них уменьшается.

Библиографический список

1. **Gojko M. Joksimovic, Jim Penman** The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 47. - 2000. - №5. - С. 1078-1084.

СЕКЦИЯ 17

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Председатель – к.т.н., доцент Словесный С.А.

Секретарь – к.т.н., доцент Шадриков Т.Е.

*Е.Д. Агапов, студ.;
рук. С.А. Словесный, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ОБРАЗЦАХ ИЗОЛЯЦИИ С ИСКУССТВЕННЫМ ВОЗДУШНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Основной причиной электрического старения изоляции высоковольтного электрооборудования являются частичные разряды (ЧР), возникающие на участках с ослабленной изоляцией или в местах наибольшей напряженности электрического поля. Под действием ЧР в изоляции из-за разрушения твердого диэлектрика образуются газовые полости, увеличивающиеся со временем настолько, что становится возможным полный пробой изоляционной конструкции.

В процессе регистрации ЧР замечено, что результаты измерений характеризуются существенным разбросом даже в одинаковых образцах изоляции с искусственным воздушным включением. Для определения причин такого разброса измеряемых характеристик и исследования механизма электрического старения полимерной изоляции разработана установка, в которой исследуемый образец изоляции размещен в измерительной ячейке, заполненной трансформаторным маслом. Электрическая прочность трансформаторного масла в 5 – 7 раз выше, чем у воздуха, поэтому в измерительной ячейке, заполненной трансформаторным маслом, частичные разряды в окружающей исследуемый образец изоляции среде, начнутся при значительно большей напряженности электрического поля, чем в случае размещения образца в воздухе. Необходимо создать условия, при которых во всем диапазоне изменения испытательного напряжения, воздействующего на исследуемый образец изоляции, напряженность электрического поля в пространстве, примыкающем к исследуемому объекту, не превышала бы значения начальной напряженности. Образец диэлектрика с искусственным включением состоит из 2 склеенных между собой пластин оргстекла, в одной из которых фрезой выполнено углубление. Изготовлено несколько образцов изоляции при использовании фрезы разных диаметров. Изменение геометрических размеров воздушного включения создает условия для варьирования величины кажущегося заряда частичных разрядов и напряжения на электродах, при котором начинается процесс возникновения частичных разрядов в искусственном включении. Длительное воздействие испытательного напряжения позволяет зарегистрировать процесс старения изоляции, выражающийся в увеличении размеров газового включения вплоть до пробоя образца.

*А.А. Баиллачев, студ.;
рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г. Иваново)*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

При проектировании силовых трансформаторов особого внимания требует обеспечение длительной надежной работы. Поэтому опытный образец трансформатора подвергается типовым испытаниям. К наиболее разрушающим испытаниям относятся испытания на электродинамическую стойкость. Для расчета стойкости трансформаторов при коротких замыканиях (КЗ) используется [1]. Однако методика, описанная в [1], неприменима для расчета обмоток из алюминиевой или медной ленты.

В разработанной нами методике расчет тока КЗ осуществляется с использованием имитационной модели, построенной в приложении MatLab Simulink SimPowerSystems [2]. Для расчета радиальных усилий в обмотках трансформатора используется библиотека конечно-элементного моделирования EMLib [3], позволяющая получить распределение индукции в различных сечениях расчетной области. Для расчета механических напряжений и деформаций элементов обмоток из ленты был выбран пакет COMSOL Multiphysics, позволяющий решать трехмерные задачи. В модели рассматривается сегмент обмотки НН между двумя рейками, равномерно разделенный на секции по высоте для учета неравномерного распределения индукции и плотности тока по высоте обмотки. В качестве исходных данных задается распределение усилий, возникающих при протекании ударного тока КЗ, полученное из модели электромагнитных процессов.

Предложена методика расчета электродинамической стойкости обмоток из ленты, позволяющая выполнить расчет механических напряжений и деформаций при КЗ. Данная методика может быть использована при проектировании и диагностике трансформаторов.

Библиографический список:

1. РД 16.431-88. Трансформаторы силовые. Расчёт электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании.
2. Снитко И.С., Тихонов А.И., Стулов А.В., Мизонов В.Е. Модель переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47-56.
3. Тихонов А.И., Иванов А.В., Пайков И.А., Стулов А.В. Математическое моделирование электромагнитных процессов в фольговых обмотках трансформаторов и токоограничивающих реакторов / ФГБОУВПО ИГЭУ. – Иваново, 2015. – 80 с.

А.В. Васильев, Д.Ю. Шабашов студ.;
Т. Е. Шадриков, к. т. н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗООБРАЗНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Газы, в частности воздух, остаются основным видом внешней изоляции линий электропередачи и высоковольтного оборудования. Понимание закономерностей развития разряда в газовых промежутках является ключевым для оценки электрической прочности изоляционных конструкций, снижения потерь энергии (например, на корону) и разработки эффективных средств защиты от перенапряжений.

Закон Пашена. Для однородного поля пробивное напряжение является функцией произведения давления газа на расстояние между электродами: $U_{пр} = f(P \cdot S)$. Кривая Пашена имеет минимум, что объясняется конкуренцией между накоплением энергии электроном на длине свободного пробега и частотой ионизирующих столкновений.

Эффект полярности и барьерный эффект. В резконеоднородных полях разрядное напряжение зависит от полярности. При положительной полярности объемный заряд усиливает поле в промежутке, снижая $U_{пр}$ в 2–2,5 раза по сравнению с отрицательной полярностью. Установка диэлектрического барьера перпендикулярно полю локализует объемный заряд, выравнивая распределение напряженности и повышая пробивное напряжение до 2 раз.

Разряд по поверхности. Разряд вдоль поверхности твердого диэлектрика определяется соотношением тангенциальной и нормальной составляющих поля. При наличии загрязнений и увлажнения возникает ток утечки, приводящий к подсушиванию поверхности и образованию частичных дуг, которые могут перекрыть изолятор.

В заключении: Электрофизические процессы в газообразных диэлектриках определяются условиями ионизации, конфигурацией электродов и внешними факторами. Понимание этих процессов позволяет оптимизировать конструкцию изоляции, снизить потери на корону и повысить надежность работы высоковольтного оборудования.

Библиографический список

1. **Важов В. Ф.**, Лавринович В. А., Лопаткин С. А. Техника высоких напряжений / Курс лекций для бакалавров направления, 140200 "Электроэнергетика" — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. - 119 с.

*А. А. Гладышев, студ.;
Т. Е. Шадриков, к. т. н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В 21-м веке электроэнергетика наряду с другими отраслями научной деятельности получила возможность использовать вычислительные мощности ПК для решения научных, учебных и других задач. Для задач электроэнергетики было разработано множество программных комплексов для создания математических моделей элементов энергосистемы – трансформаторов, выключателей, генераторов и т.д. Задача создания цифрового двойника силового трансформатора стала основной задачей проводимого исследования.

Для моделирования был выбран силовой трансформатор ТРДН-25000/110/10, параметры электрической и магнитной части которого были взяты из учебного пособия по расчету трансформаторов Тихомирова П.М.[1]. В качестве программы для моделирования был выбран программный комплекс Ansys, а именно Ansys Maxwell. Стрежень и ярмо трансформатора согласно [1] выполнены из электротехнической стали Э330А и выполнен из 15 ступеней. Число витков одной обмотки НН равно 85, обмотки ВН равно 896. Две обмотки НН и одна обмотка ВН выполнены цилиндрическими, витки обмоток и направление их намотки указаны программно. Для проведения различных расчетов с трансформатором была использована возможность Ansys Maxwell подключения к обмоткам трансформатора внешней электрической цепи. Во внешней цепи выполнено соединение обмоток ВН в заземленную звезду, обмотки НН1 и НН2 соединены с треугольник и закорочены между собой для проведения опыта короткого замыкания для замера сопротивления трансформатора. К части ВН трансформатора подсоединены амперметры и синусоидальные источники напряжения 110 кВ.

По результатам моделирования амплитудное значение тока через амперметр составило 1426 А, сопротивление же трансформатора согласно закону Ома составляет 63 Ома, что на 11% больше расчетного сопротивления трансформатора.

Библиографический список

1. **Тихомиров П. М.** Расчет трансформаторов. Учеб. Пособие для вузов. 1976 г. 544 с.

*В.М.Кушиков, студ.;
Т. Е. Шадриков, к. т. н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

КОМПЛЕКСНОЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ НА ПРИМЕРЕ ФОРСТЕРИТОВОЙ КЕРАМИКИ (Mg_2SiO_4)

Проведено систематическое исследование электрофизических процессов в форстеритовой керамике Mg_2SiO_4 – диэлектрике без старения (в отличие от стеатита). Актуальность: применение в СВЧ, ядерной энергетике, аэрокосмической отрасли. Цель – систематизация знаний о процессах и методах диагностики.

Результаты. Описаны механизмы поляризации (электронная, ионная, дипольная, миграционная), проводимости (закон Аррениуса: энергия активации примесная 0,5–0,7 эВ, собственная 1,2–1,5 эВ), потерь ($tg\delta$) и пробоя. Форстерит: структура ромбическая, $\epsilon = 6,3–6,9$, $tg\delta = 5 \cdot 10^{-4}$, $\rho_v = 10^{14}–10^{15}$ Ом·см, $E_{пр} = 200–300$ кВ/мм. Преимущества: отсутствие полиморфных превращений, совместимость с титаном (ТКЛР $8–11 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹). Технология: двухстадийное спекание (1350–1380 °С), примеси $Fe_2O_3 < 0,5$ %, модификация катионным обменом (прочность до 280 МПа). Механизмы: ионная проводимость (Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+}), пористость >2 % снижает $E_{пр}$ в 2–3 раза. Методы диагностики: мегаомметрия, мост Шеринга ($tg\delta \leq 5 \cdot 10^{-4}$), обнаружение частичных разрядов (чувствительность $\sim 10^{-12}$ Кл), метод «ёмкость–частота», испытание напряжением, хроматография газов. Эксперименты: эффект Керра, пузырьковая модель зажигания (уравнение Рэлея), зависимость $E_{пр}$ от давления, температуры, площади электродов, моделирование Probov.exe.

Научная новизна – комплексный анализ на основе трёх источников. Практическая значимость – выбор изоляции, технологические режимы, диагностика.

Выводы: форстерит превосходит стеатит по стабильности, корунд – по технологичности. Рекомендованы чистое сырьё, пористость <2 %, ежегодная диагностика.

Библиографический список

1. Толкачева А.С., Павлова И.А. Технология керамики для материалов электронной промышленности. Ч. 1. — Екатеринбург: УрФУ, 2019. — 124 с.
2. Коробейников С.М. Электрофизические процессы в газообразных, жидких и твердых диэлектриках. — Новосибирск: НГТУ, 2010. — 116 с.

*Н.С. Магрычев, П.А. Пряхин, студ.;
рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

В 2024 году на кафедре ВЭТФ для проведения исследований в области импульсных технологий был развернут лабораторный комплекс на базе генератора импульсных токов (ГИТ). В технической документации на ГИТ отсутствуют данные по характеристикам разрядного контура, так как оборудование разработано для испытания стандартным грозовым импульсом тока варисторов защитных аппаратов. Для оценки возможностей использования ГИТ для других целей, в том числе и для магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ) надо знать электрические параметры разрядного контура. С этой целью проведены измерения тока при разряде емкостного накопителя ГИТа с разным количеством конденсаторов в батарее (разная зарядная емкость C_3) в режиме короткого замыкания. По параметрам затухающего колебательного импульса тока при разряде были определены частота ω и период колебаний T в контуре, индуктивность L_0 и сопротивление контура R_0 , критическое сопротивление ГИТ $R_{крит}$, коэффициент затухания δ (табл. 1).

Таблица 1 Параметры разрядного контура ГИТ

Количество конденсаторов в батарее	C_3 , мкф	T , мкс	L_0 , мкГн	R_0 , Ом	$R_{крит}$, Ом	$\delta \cdot 10^3$, рад	$\omega \cdot 10^4$, рад/сек
1	2	13.1	2.13	0.33	2.06	77,6	47,8
2	4	14.7	1.35	0.17	1.16	63,2	42,5
3	6	16.3	1.09	0.11	0.85	53,5	38,5
4	8	17.7	0.97	0.08	0.69	45,4	35,4
5	10	18.9	0.89	0.07	0.59	40,2	33,2

Эксперимент также показал, что равномерное расположение конденсаторов вокруг сборной шины приводит к снижению общей индуктивности и сопротивления контура за счет распределения тока по шине.

Полученные результаты будут использованы при проектировании индукторов и расчете импульсов тока в них для применения ГИТ в задачах МИОМ.

*П.В. Писарев, студ.;
рук. Ю.М. Смирнова, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ НА КОРОНУ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОВОДОВ

Повышение энергоэффективности электросетей, в частности, снижение потерь электроэнергии, является одной из ключевых задач. В сетях сверхвысокого напряжения значительная часть потерь приходится на коронные разряды. Используемый метод снижения потерь на корону для линий электропередачи напряжением 330-750 кВ основаны на оптимизации конструктивных параметров расщепленных проводов.

Альтернативным подходом, активно развивающимся в последнее время, является применение функциональных покрытий проводов для уменьшения интенсивности коронных разрядов, особенно в условиях неблагоприятных погодных явлений. Для экспериментальной оценки были проведены испытания проводов с двумя типами покрытий: гидрофобные и гидрофильные [1]. Испытания проводились в сухом состоянии и при дожде с интенсивностью 1 мм/мин. Провод с супергидрофобным покрытием не продемонстрировал существенного снижения потерь ни в сухом состоянии, ни под дождем. Наилучшие результаты показал провод с гидрофильным покрытием, нанесенным методом микродугового оксидирования. В условиях дождя потери на корону снизились в 1,6 раза по сравнению с контрольным проводом без покрытия. Этот эффект достигается за счет предотвращения образования капель на поверхности провода, которые являются источниками коронных разрядов во время дождя. Гидрофильное покрытие устойчиво к воздействию высоких напряженностей электрического поля и коронных разрядов, что подтверждается неизменностью характеристик разрядов при изменении напряжения. В настоящее время провод с гидрофильным покрытием проходит опытно-промышленную эксплуатацию.

Библиографический список

1. Капустин А.П., Крусс А.М., Лебедев Д.Е., Мазикин Н.В., Семендяев Р.Ю. Снижение потерь на корону воздушных линий электропередачи классов напряжения 330-750 кВ с использованием функционального покрытия провода // *Электроенергия. Передача и распределение* – № 5(80), сентябрь-октябрь 2023 – С. 102-106.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1967. 592 с.

*П.А. Пряхин, М.М. Петрова, студ.;
Т. Е. Шадриков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЛОЖНОЭФИРНЫХ И НАНОКОМПОЗИТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Современная электроэнергетика переходит от минеральных масел к сложным эфирам из-за ужесточения требований к пожарной и экологической безопасности. Синтетические эфиры демонстрируют превосходную окислительную стабильность и гигроскопичность, позволяющую осушать целлюлозную изоляцию, а натуральные эфиры из возобновляемого сырья продлевают ресурс бумажной изоляции в 5–8 раз, но ограничены повышенной вязкостью при отрицательных температурах [1]. Актуальные исследования направлены на модификацию эфирных жидкостей наноразмерными присадками: диспергирование наночастиц диоксида титана снижает температуру застывания с -5°C до -32°C , а введение наночастиц железо-медных сплавов повышает электрическую прочность на 32%. Экономически целесообразным переходным решением является создание гибридных смесей минерального масла с 10–30% синтетического эфира, улучшающих пожаробезопасность и пробивное напряжение без замены оборудования [2]. Таким образом, развитие технологий эфирных диэлектриков и наножидкостей – важный фактор повышения надежности и экологичности распределительных сетей нового поколения.

Библиографический список

1. **Khan S.A. et al.** A systematic review of cost-effective biodegradable vegetable-based nanofluids for green transformer oil // *J. Mol. Liq.* — 2024. — Vol. 405. — 124892. DOI: 10.1016/j.molliq.2024.124892.
2. **Ghunem R.A.** et al. Enhancing natural ester insulating liquids: a review on antioxidant additives for oxidation stability // *Energies.* — 025. — Vol. 18, no. 7. — 1690. DOI: 10.3390/en18071690.

Содержание

Секция 12. Электрические системы

<i>Бабочкин В.В., рук. Братолобов А.А.</i> Эффективность противоаварийного управления мощностью первичных двигателей генераторов для поддержания устойчивости ЭЭС	4
<i>Баймуратов А.А., рук. Середа Н.В.</i> Влияние роста вычислительных мощностей BIG DATA центров на потребление электроэнергии	5
<i>Биденкова Д.А., рук. Рафиков В.Р.</i> Сравнительный анализ математических моделей синхронных генераторов	6
<i>Бобкова А.Р., рук. Рафиков В.Р.</i> Анализ влияния значений параметров моделей синхронных генераторов на результаты расчета динамической устойчивости	7
<i>Гуля А.А.</i> Особенности проектирования электросетей в условиях климата и рельефа Амурской области	8
<i>Затулков С.Д., рук. Мартиросян А.А.</i> Повышение пропускной способности ЛЭП за счёт применения управляемых устройств продольной компенсации	9
<i>Капанина-Гамина А.О., Тычкин А.Р., рук. Мартиросян А.А.</i> Анализ влияния ВЭС на статические характеристики узла нагрузки	10
<i>Клюбанов В.В., рук. Орехов В.А.</i> Применение систем накопления электроэнергии для повышения надёжности энергосистем в условиях энергодефицита	11
<i>Логинов П.А., Родин Н.А., рук. Мурзин А.Ю.</i> Определение параметров схемы замещения кабельных линий при внутренних повреждениях	12
<i>Лысов Д.А., рук. Иванов И.Е.</i> Идентификация параметров воздушных ЛЭП при коротких замыканиях с использованием аварийных осциллограмм	13
<i>Муранская Л.Е., рук. Шакиров В.А.</i> Оптимизация развития распределительной сети с размещением генерации на основе генетического алгоритма и RuPSA	14
<i>Недвиг А.А., Суханова О.С., рук. Кормилицын Д.Н.</i> Особенности моделирования систем с управляемым устройством продольной компенсации в программной среде «MATLAB/SIMULINK» с целью верификации данных	15
<i>Рожин А.А., рук. Кутумов Ю.Д.</i> Исследование характеристик нерегулярных колебаний активной мощности	16

<i>Рябенкова Д.М., рук. Мурзин А.Ю.</i> Моделирование электротехнических устройств продольного регулирования напряжения в фазном координатном базисе	17
<i>Рядкова М.Ю., рук. Кормилицын Д.Н.</i> Анализ распределения углов напряжения в электропередающей системе с управляемым устройством продольной компенсации	18
<i>Смирнов Э.А., рук. Иванов И.Е.</i> Разработка и верификация модели для оценки динамической устойчивости ЭЭС с использованием фазных координат	19
<i>Соловьев С.Д., рук. Бушуева О.А.</i> Режимные характеристики компактной управляемой линии электропередачи 220 кВ	20
<i>Торопов К.А., рук. Кулешов А.И.</i> Моделирование пункта автоматического регулирования напряжения	21
<i>Убодоева В.Б., рук. Шакиров В.А.</i> Автоматизированная подготовка данных о техническом потенциале ветровой и солнечной генерации	22
<i>Ширшова Е.И., рук. Иванов И.Е.</i> Исследование влияния отдельных факторов при оценке динамической устойчивости ЭЭС на базе трехфазной имитационной модели	23
<i>Яковлев М.В., рук. Братолобов А.А.</i> Исследование влияния вариации исходных данных при различных моделях синхронного генератора и схемах ЭЭС на оценку её устойчивости	24

Секция 13. Электроснабжение

<i>Абрамов Е.М., рук. Бушуева О.А.</i> Системы электроснабжения с распределенной генерацией	26
<i>Барнакова Д.А., рук. Шакиров В.А.</i> Разработка программы для синтеза профилей нагрузки распределительных электрических сетей.	27
<i>Бахирева Е.С., рук. Кормилицын Д.Н., Полкошников Д.А.</i> Повышение энергоэффективности систем электроснабжения при эксплуатации асинхронного электропривода.	28
<i>Борисов С.П., рук. Юренков Ю.П.</i> Влияние формы сечения плавкой вставки на токоограничивающий эффект предохранителя.	29
<i>Демидкина Л.К., рук. Амелин С.А.</i> Коэффициент мощности светодиодных ламп с линейными драйверами.	30
<i>Кутейников П.Д., рук. Шилин А.Н.</i> Интеллектуальное реле частоты и напряжения.	31
<i>Мальцев Р.А., Титов В.А., рук. Сорокин А.Ф., Яблоков А.А.</i> Анализ распределения суточных электрических нагрузок однотипных потребителей.	32

<i>Нужакишева С.В., Петухов Я.И., рук. Липужин И.А.</i> Разработка математической модели ванадиевого проточного аккумулятора.	33
<i>Петухов Я.И., Крюков Е.В., рук. Лоскутов А.А.</i> Повышение эффективности управления алгоритмами виртуальной инерции.	34
<i>Пименова Н.В., рук. Шакиров В.А.</i> Имитационная модель для выбора конфигурации гибридного энергокомплекса.	35
<i>Полушкин М.А., рук. Бушуева О.А.</i> Особенности режимов электрической сети района города с распределённой генерацией.	36
<i>Соколов В.А., рук. Андрианов Д.П.</i> Обеспечение оптимальных условий эксплуатации конденсаторных установок компенсации реактивной мощности.	37
<i>Сухачев А.С., рук. Бушуева О.А.</i> Влияние провала напряжения на технологический процесс предприятия с непрерывным технологическим процессом.	38
<i>Тимошин К.Е., рук. Бушуева О.А.</i> Влияние режимов работы нагрузок потребителя на качество электроэнергии в электрических сетях энергосистемы.	39
<i>Титков Д.Р., рук. Аржанникова А.Е.</i> Использование напряжения 20 кВ в системах электроснабжения городов.	40
<i>Титов В.А., рук. Яблоков А.А.</i> Принцип формирования «цифрового отпечатка потребителя» для задач прогнозирования электрической нагрузки.	41
<i>Филиппов М.Р., рук. Липужин И.А.</i> Разработка и тестирование имитационной модели энергоустановки с водородными топливными элементами.	42
<i>Шафигуллина А.Г.</i> Энергосбережение в современной энергетике: внедрение технологий и повышение энергоэффективности	43
Секция 14. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем	
<i>Айсин Р.Д., рук. Вихарев Д.Ю.</i> Исследование отклонения вольт-амперных характеристик трансформаторов тока с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-25.	45
<i>Айсин Р.Д., рук. Родин Н.А.</i> Разработка расчётной модели участка собственных нужд блока № 1 Курской АЭС-2.	46
<i>Алёшин К.С., Кузьмина Н.В., рук. Шуин В.А.</i> Дополнительные параметры и критерии их измерения, используемые в цифровых токовых многопараметрических защитах от однофазных замыканий на землю.	47

<i>Алёшин К.С., Кузьмина Н.В., рук. Шуин В.А.</i> Обоснование уставок по дополнительным параметрам многопараметрических токовых защит от замыканий на землю в кабельных и воздушных сетях 6–10 кВ.	48
<i>Антонов А.Н., рук. Лебедев В.Д.</i> Исследование частотного спектра фазных напряжений электромагнитных ТН при феррорезонансе в сетях 6–35 кВ.	49
<i>Антонов А.Н., рук. Лебедев В.Д.</i> Имитационная модель для исследования феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью.	50
<i>Бондаренко Н.А., Кибовский Г.Е., рук. Климова Т.Г.</i> Применение методов искусственного интеллекта для настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов.	51
<i>Васильченко М.М., Виноградов Р.М., Тычкин А.Р., рук. Яблоков А.А.</i> Разработка методов и экспериментальной установки для определения параметров имитационной модели трансформатора тока.	52
<i>Вихарев Д.Ю., рук. Мурзин А.Ю.</i> Восстановление вторичного тока трансформатора тока при насыщении его магнитопровода на основе измерения индуктивности ветви намагничивания	53
<i>Галанин И.А., рук. Шадрикова Т.Ю.</i> Выбор нейросети для классификации разнovidностей однофазных замыканий на землю в кабельной сети 6–10 кВ.	54
<i>Двойненко М.В., рук. Шуин В.А.</i> Моделирование алгоритма блокировки при качаниях по приращению токов устройств серии «Сириус».	55
<i>Жаравин Ф.А., Калугин А.А., Трунилин Н.А., рук. Лебедев В.Д.</i> Экспериментальное исследование характеристик намагничивания трансформаторов напряжения.	56
<i>Идрисов Д.М., рук. Лебедев В.Д.</i> Исследование способа компенсации погрешностей электромагнитного ТТ.	57
<i>Идрисов Д.М., рук. Лебедев В.Д.</i> Моделирование электромагнитного ТТ.	58
<i>Казакул А.А., Попов И.В.</i> Моделирование однофазных замыканий на землю в электрической сети с резистивно-заземлённой нейтралью в ПВК ENERGY CS ТКЗ.	59
<i>Кондратьев Д.И., рук. Яблоков А.А.</i> Исследование надёжности работы алгоритмов быстродействующего автоматического ввода резерва.	60
<i>Краснов А.А., Кошельков И.А., Воронов П.Л.</i> Решения дефицита коммутаторов с РТР на ВАПС III типа.	61

<i>Кругликов В.П., Панащатенко А.В., рук. Яблоков А.А.</i> Определение параметров электромагнитных трансформаторов тока на стадии проектирования.	62
<i>Крунов М.А., рук. Кутумов Ю.Д.</i> Об аспектах моделирования вставок и передач постоянного тока для расчётов токов короткого замыкания.	63
<i>Минаев К.Д., рук. Шифрин И.О.</i> Интеграция систем мониторинга переходных режимов (WAMS) в контур автоматического противоаварийного управления энергосистемой.	64
<i>Панащатенко А.В., рук. Яблоков А.А.</i> Методы определения постоянных времени апериодических составляющих тока короткого замыкания в схемах сложной конфигурации.	65
<i>Пидько З.Ф.</i> Диагностика систем противоаварийной автоматики в условиях цифровой подстанции.	66
<i>Потапов С.А., рук. Алексинский С.О.</i> Энергетические вызовы высокопроизводительных вычислений и систем хранения данных в России: анализ и стратегии размещения	67
<i>Потемкин И.А., рук. Филатова Г.А.</i> Расчёт параметров срабатывания УРЗА блоков атомной электростанции с использованием сервиса «Лаборатория РЗА».	68
<i>Резеньков П.А., рук. Петров А.Е.</i> Параметрическая модель пуска асинхронного электродвигателя в OгCAD на основе паспортных характеристик.	69
<i>Романов Л.Р., рук. Крюков О.В.</i> Применение линейно-дискриминантного анализа для реализации многопараметрической токовой защиты.	70
<i>Синяков А.А., рук. Яблоков А.А.</i> Автоматические испытания микропроцессорного устройства быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) «МИР 200».	71
<i>Титов В.А., Глазкова Л.А., рук. Яблоков А.А.</i> Разработка конструктора методик определения параметров срабатывания УРЗА для автоматического расчёта.	72
<i>Фатеев К.А., рук. Орехов В.А.</i> Повышение быстродействия и селективности релейной защиты в сетях с распределённой генерацией на основе адаптивных уставок.	73
<i>Харина Д.А., рук. Воробьева Е.А.</i> Создание и анализ расчётной модели схемы собственных нужд блока № 4 Калининской АЭС для расчётов токов короткого замыкания в целях релейной защиты и автоматики.	74

<i>Цветков М.И., рук. Кутумов Ю.Д.</i> Об аспектах моделирования кабельных линий напряжением 6–35 кВ для решения задачи дистанционного определения расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю.	75
<i>Шумилов Д.А.</i> Важность испытательных аппаратов для проверки срабатывания защитных устройств	76
<i>Шустров А.В., рук. Лебедев В.Д.</i> Исследование характеристик магнитопроводов первичных преобразователей тока из аморфной стали для цифровых измерительных трансформаторов.	77
<i>Шустров А.В., рук. Лебедев В.Д.</i> Текущее состояние и перспективы развития цифровых измерительных трансформаторов	78

Секция 15. Электротехника и электротехнологии

<i>Акентьев Д.С., Жигарев Н.А., рук. Смолин В.А.</i> Принцип работы и использование магнетронной пушки.	80
<i>Антонова Е.М.</i> Перспективы применения безлопастных ветрогенераторов.	81
<i>Бакаев К.С., рук. Долгих И.Ю.</i> Разработка электромагнитной модели цилиндрического индуктора.	82
<i>Баянов Б.Н., рук. Рассказа Д.С.</i> Проблемы реализации понижающих DC-DC преобразователей и методы их решения.	83
<i>Будакова В.М., Бершанская Е.С., Дюльдина А.Н., рук. Чекан Г.В., Долгих И.Ю.</i> Использование систем измерения для повышения надёжности электротехнических установок АЭС.	84
<i>Вязовцева Е.В., рук. Долгих И.Ю.</i> Моделирование температурных процессов при нагреве цилиндрической заготовки внутренними источниками тепла.	85
<i>Заводчиков А.А., рук. Уразбахтина К.Р.</i> К вопросу о применении электромехатронной системы для контроля параметров воздушной среды.	86
<i>Зыков Н.С., рук. Макаров А.В.</i> Разработка источника питания для аргонодуговой сварки.	87
<i>Качинский Д.В., рук. Смолин В.А.</i> Структура аркадного игрового автомата.	88
<i>Короткевич Д.В., Колмачёва П.С., рук. Рудченко Г.А.</i> Водород в устойчивых энергосистемах: инновации производства и хранения с использованием искусственного интеллекта.	89
<i>Сплендер П.В., рук. Сайкин М.С.</i> Поиск рациональных соотношений размеров и характеристик постоянных магнитов магнитного подвеса магнитожидкостного виброметра.	90

<i>Староверова Д.В., рук. Ларькина А.А.</i> Вакуумные дугогасительные камеры: эволюция и пределы коммутационной способности.	91
<i>Старостенков Я.Н., рук. Коваль В.А.</i> Разработка 3D-моделей наноантенн для стабилизации SEI-слоя в литий-ионных аккумуляторах.	92
<i>Селюшкин Я.А., рук. Долгих И.Ю.</i> Исследование электромагнитных процессов электроконтактного нагрева цилиндрических заготовок на переменном токе.	93
<i>Цыгина В.В., рук. Рассказа Д.С.</i> Обоснование архитектурных решений микропроцессорных систем умного дома посредством анализа потребительских предпочтений	94

Секция 16. Электрооборудование и режимы
электрических станций и подстанций

<i>Аникеев В.А., рук. Страхов А.С.</i> Влияние количества оборванных стержней обмотки ротора на спектр тока статора асинхронного двигателя	96
<i>Архипкин В.А., рук. Лапшин В.М.</i> Сравнительный анализ расчетов токов КЗ от группы асинхронных двигателей с использованием методик национального стандарта и стандарта МЭК	97
<i>Бардюков Н.Е., рук. Савельев В.А.</i> Новый подход к организации мониторинга силовых трансформаторов	98
<i>Вахолина В.А., Литвинов С.Н., рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка способа контроля технического состояния изоляции, цифровых измерительных трансформаторов	99
<i>Вейсман Д.А., рук. Новоселов Е.М.</i> Физическое моделирование дисбаланса асинхронного двигателя	100
<i>Голубев Д.М., рук. Елистратов В.В.</i> Сравнительный анализ конструкций цифровых подстанций на плавающих платформах для глубоководных ветропарков Баренцева моря	101
<i>Голубев Д.М., рук. Елистратов В.В.</i> Сравнительный анализ режимов работы цифровой подстанции на плавающей платформе для глубоководных морских ветропарков	102
<i>Ежов Д.А., рук. Савельев В.А.</i> Применение искусственных нейронных сетей для диагностики силовых трансформаторов	103
<i>Еришов Д.О., рук. Скоробогатов А.А.</i> Диагностика асинхронных электродвигателей с помощью частотно-временных диаграмм	104
<i>Ковалева К.С., рук. Жуков В.В.</i> Координация уровней токов короткого замыкания при создании энергокомплекса на базе АЭС малой мощности и газотурбинных электростанций	105
<i>Лопухов А.А., Литвинов С.Н., рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка способа теплового контроля цифрового измерительного трансформатора	106
<i>Меньшов В.А., рук. Лацугин В.Ф.</i> Определение режимных ограничений системы накопления электроэнергии при её работе в энергосистеме	107

<i>Микин А.Н., рук. Скоробогатов А.А.</i> Анализ сигналов тока статора асинхронных электродвигателей собственных нужд АЭС для выявления повреждений в обмотке ротора	108
<i>Минаев К.Д., рук. Шифрин И.О.</i> Оценка технического состояния высоковольтных выключателей по данным мониторинга временных параметров коммутационных циклов	109
<i>Овчарук А.П., Попов К.А., рук. Смотров Н.Н.</i> Влияние токоограничения полупроводниковых инверторов на чувствительность защитных аппаратов при коротких замыканиях	110
<i>Олейник В.О., рук. Савельев В.А.</i> Влияние качества электроэнергии на работу силовых трансформаторов	111
<i>Почитаев А.С., рук. Страхов А.С.</i> Сравнение спектров сигналов асинхронного двигателя при разных видах эксцентриситета	112
<i>Савченко А.Ю., рук. Добродей А.О.</i> Использование NI Multisim для анализа перенапряжений в сети 6 кВ	113
<i>Сарычев К.О., рук. Страхов А.С.</i> Обнаружение повышенного эксцентриситета турбогенераторов на основе анализа спектра тока статора	114
<i>Смирнов Г.Д., рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка математической модели высоковольтного синхронного электродвигателя для исследования повреждений демпферной обмотки	115
<i>Суляев А.Д., рук. Новоселов Е.М.</i> Физическое моделирование межвитковых замыканий в обмотке статора асинхронного двигателя	116
<i>Чирков А.Р., рук. Скоробогатов А.А.</i> Исследование влияния межвитковых замыканий на ток статора асинхронного электродвигателя	117
Секция 17. Высоковольтная электроэнергетика и электротехника	
<i>Агапов Е.Д., рук. Словесный С.А.</i> Моделирование частичных разрядов в образцах изоляции с искусственным воздушным включением	119
<i>Башлачев А.А., Снитько И.С., Стулов А.В., рук. Тихонов А.И.</i> Методика расчёта обмоток трансформатора на электродинамическую устойчивость	120
<i>Васильев А.В., Шабашов Д.Ю., рук. Шадриков Т.Е.</i> Электрофизические процессы в газообразных диэлектриках	121
<i>Гладышев А.А., рук. Шадриков Т.Е.</i> Создание цифрового двойника силового трансформатора	122
<i>Кушиков В.М., рук. Шадриков Т.Е.</i> Комплексное систематическое исследование электрофизических процессов в твёрдых диэлектриках на примере форстеритовой керамики (Mg_2SiO_4)	123
<i>Магрычев Н.С., Пряхин П.А., рук. Вихарев А.В.</i> Экспериментальное определение параметров разрядного контура генератора импульсных токов	124
<i>Писарев П.В., рук. Смирнова Ю.М.</i> Уменьшение потерь на корону с помощью специализированных покрытий проводов	125

Пряхин П.А., Петрова М.М., рук. Шадриков Т.Е. Перспективы применения сложноэфирных и нанокompозитных диэлектрических жидкостей в высоковольтном оборудовании

126

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
(ТРИНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ЭНЕРГИЯ-2026»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

*Составители: Филатова Г.А., Яблоков А.А.
Компьютерная верстка Готовкиной Е.Е.
Печатается в авторской редакции*

Подписано в печать 14.04.2025. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 8,31 (Том 3).

Электронное издание
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.