



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЭНЕРГИЯ-2025

ДВАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
(ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

17-19 марта 2025 г.
г. Иваново

ТОМ 3

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



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2025»

**ДВАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
(ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

г. Иваново, 17 - 19 марта 2025 года

ТОМ 3

ИВАНОВО

ИГЭУ

2025

УДК 620 + 621

ББК 31

Э 45

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА // Двадцатая всероссийская (двенадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2025»: материалы конференции. В 6 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2025. – 117 с.

ISBN 978-5-00062-678-8

ISBN 978-5-0062-677-1 (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: Тютиков В.В., 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: Аполонский В.В.

Координационная группа: Вольман М.А., Мошкарина М.В., Зайцева Е.В., Сидоров А.А., Яблоков А.А., Аполонский В.В.

СЕКЦИЯ 12
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

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

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

*А.Н. Раматов, докторант; рук. Т.Ф. Махмудов, PhD, доц.
(ТашГТУ, г. Ташкент)*

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Расчеты, связанные с определением параметров установившегося режима электроэнергетических систем, являются наиболее часто проводимыми исследованиями, выполняющимися практически на всех этапах планирования, оптимизации, эксплуатации и управления. На практике диспетчерского управления зачастую требуется провести «экспресс» расчет установившегося режима. При этом в последнее время искусственные нейронные сети набирают популярность из-за их вычислительной скорости, способности обрабатывать нелинейные функции [1]. Здесь предлагается использовать искусственную нейронную сеть прямого распространения для быстрого расчета параметров режима.

Особенности нейронных сетей, которые делают их привлекательными при решении проблем расчета параметров установившегося режима, следующие [2]:

- нейронные сети позволяют производить обработку больших объемов данных в реальном времени;
- нейронные сети чрезвычайно полезны при решении задач, описываемых нелинейными уравнениями;
- нейронные сети не требуют априорного знания функций, которые связывают переменные параметры режима (ΔP , ΔQ , U , δ).

В качестве входных данных предлагается использовать значения мощностей нагрузок и напряжения головного узла, в качестве же выходных значения напряжений узлов и значения суммарных потерь активной и реактивной мощностей по сети.

В качестве недостатков применения искусственных нейронных сетей стоит отметить трудоемкость настройки гиперпараметров: разделение исходных данных на выборки; выбор количества нейронов и функции активации.

Библиографический список

1. **Khodayar M.**, Regan J. Deep Neural Networks in Power Systems: A Review // *Energies*, 16(12):4773. <https://doi.org/10.3390/en16124773>
2. **Jalal M. Abdallah**, Abdullah R. Al-Zyoud Voltage and Reactive Power Control Simulations Using Neural Networks // *International Journal of Simulation Systems Science & Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 64-72.

*Д.Ю. Лосев, соискатель PhD, ассистент,
(ТашГТУ, г.Ташкент)*

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ГОДОВОГО СПРОСА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В условиях созидания и функционирования рынка электроэнергии, а также в целях определения стратегии по топливу и обеспечения спроса на электроэнергию в перспективе актуальной задачей становится долгосрочное прогнозирование данного параметра.

Долгосрочное прогнозирование, как и другие виды прогнозирования, играет важную роль при реализации экономически выгодных стратегий, но также может способствовать решению экологических проблем или разработке рекомендаций по их решению [1].

Например, при прогнозировании потребления электроэнергии необходимо учитывать стратегию декарбонизации отрасли и другие факторы, влияющие на потребление и производство электроэнергии в долгосрочной перспективе.

Исследователи отмечают, что для того, чтобы прогноз потребления электроэнергии был достоверным, горизонт прогнозирования должен составлять не более трех–пяти лет, посвященных долгосрочному прогнозированию. Также полагается, что для повышения точности прогноза особо важным является выбор наиболее влияющих факторов. В долгосрочном прогнозировании спроса на электроэнергию по энергосистеме страны в качестве факторов можно выбрать: годовое потребление электроэнергии, среднегодовая температура окружающей среда и годовой показатель численности населения.

Для повышения точности результата долгосрочного прогнозирования годового спроса на электроэнергию возможно во входных данных принять информацию, соответствующую времени года (зима, весна, лето и осень).

Таким образом, определив результаты прогноза по временам года, можно получить прогноз спроса на электроэнергию энергосистемы страны за соответствующий год.

Библиографический список

1. **Аллаев К.Р.** Современная энергетика и перспективы ее развития. / Под общей редакцией академика А.У. Салимова. – Т.: Fan va tehnologiyalar, 2021. – 957 с.

*Д.Ю. Лосев, соискатель PhD, ассистент,
(ТашГТУ, г. Ташкент)*

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящее время используется множество различных подходов, методов и моделей прогнозирования энергопотребления на перспективу, но у каждого подхода есть свои особенности. При долгосрочном прогнозировании параметров режима электроэнергетической системы (ЭЭС) имеется ряд вопросов, которые определяют его стратегию [1].

Первый вопрос предусматривает выбор одного из двух нижеприведенных подходов долгосрочного прогнозирования потребляемой нагрузки энергосистемы. Первый подход предполагает прогнозирование потребления электроэнергии и получить по этим данным прогноз максимальной нагрузки. Преимуществом подхода является то, что тенденции роста потребления электроэнергии более или менее стабильны, а также тесно связаны с демографическими и экономическими факторами. Второй подход предполагает выполнение прямого прогноза максимума потребляемой нагрузки ЭЭС. Преимущество подхода состоит в прямой связи прогнозируемой величины с таким показателем как температура.

Второй вопрос состоит в том, как выполнить прогнозирование суммарной потребляемой нагрузки энергосистемы: исходя из прогнозов, её составляющих потребления энергосистемы или по ретроспективным данным суммарной потребляемой нагрузки. Преимущества прогнозирования по составляющим заключаются в возможности оценки тенденций изменения характеристики потребления каждой группы нагрузок, что уменьшает вероятность ошибки прогноза суммарной нагрузки

Третий вопрос предусматривает выбор метода для использования при прогнозировании параметров режима электроэнергетических систем.

Выбор наилучшего метода для прогнозирования может быть выполнен только на основе подробного анализа результатов, полученных с помощью применения различных методов.

Библиографический список

1. **Аллаев К.Р.** Современная энергетика и перспективы ее развития. / Под общей редакцией академика А.У. Салимова. – Т.: Fan va tehnologiyalar, 2021. – 957 с.

*А.Е. Храмов, асп.; рук. В.В. Ваняев, к.т.н., доц.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород)*

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В настоящее время РФ является крупнейшим игроком на рынке мировой энергетики, выступая в качестве производителя, потребителя и экспортера всех видов углеродных энергетических ресурсов. Для устойчивого развития топливно-энергетического комплекса нашей страны необходимо расширение сырьевой базы существующей углеродной энергетики [1]. В этой связи актуальным становится освоение энергетических ресурсов Мирового океана. Особое внимание уделяется газогидратам, которые в ближайшие десятилетия могут стать одним из основных источников ископаемого топлива [2]. Решение этой задачи связано с расширением подводных глубинных исследований, что увеличивает область применения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), которые оснащены научно-исследовательским оборудованием. Такие устройства характеризуются значительным энергопотреблением и работают как в длительных, так и в кратковременных режимах. Системы электропитания (СЭП) ТНПА должны иметь малую массу и габариты, высокую надежность, устойчивость при нештатных режимах работы нагрузок.

В данном докладе приведены результаты разработки СЭП ТНПА на базе резонансных инверторов напряжения суммарной выходной мощностью 40 кВт. Предложенные алгоритм управления и схемотехнические решения обеспечивают жесткие внешние характеристики СЭП, которые не зависят от изменения напряжения питающей сети надводной части системы. Проведенные испытания СЭП ТНПА подтвердили обоснованность выбранных схемотехнических решений, алгоритмов управления и работоспособность СЭП в различных режимах, в том числе в условиях аварийных нагрузок.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема №FSWE-2025-0002).

Библиографический список

1. **Энергетическая** стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – URL: <http://government.ru/docs/39847/>. – Текст: электронный (дата обращения 11.02.2025).
2. **Концепция** федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016 – 2031 гг. – URL: <http://government.ru/docs/18570/>. – Текст: электронный (дата обращения 11.02.2025).

Т.В. Петракова, П.А. Балаев, студ.; рук. Р.В. Булатов, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

ВЛИЯНИЕ МЕСТА ПОДКЛЮЧЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ СНЭЭ НА УСЛОВИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС

Обеспечение устойчивой параллельной работы генераторов при возмущениях является основным требованием надежной работы электроэнергетической системы (ЭЭС) [1].

Цель работы заключалась в оценке влияния места установки аккумуляторной системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) на условия динамической устойчивости (ДУ) ЭЭС. Исследуемая схема ЭЭС представлена на рис. 1 (а). Для анализа взаимодействия элементов ЭЭС и СНЭЭ были разработаны их имитационные модели, а также создана новая модифицированная система управления СНЭЭ. Расчеты проводились в программном комплексе *Matlab Simulink*, использующем методы математического моделирования, основанные на дифференциальных уравнениях [2]. Результаты исследования подтверждают влияние места подключения СНЭЭ на условия ДУ системы, так как при подключении СНЭЭ согласно варианту №1 устойчивость сохраняется, а при подключении согласно варианту №2 – нарушается [рис. 1 (б)]. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых СНЭЭ в составе ЭЭС.

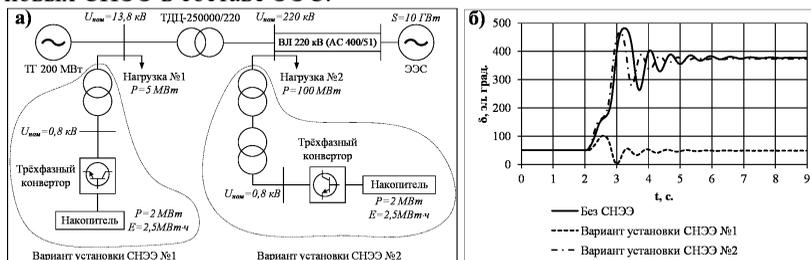


Рисунок 1. а) Схема рассматриваемой ЭЭС с вариантами подключения СНЭЭ;

б) Результаты моделирования трехфазного короткого замыкания в начале линии 220 кВ.

Библиографический список

1. **Веников В.А.** Электрические системы: Автоматизированные системы управления режимами энергосистем. – Т.7. – Высшая школа, 1979. – 447 с.;
2. **Булатов Р.В., Петракова Т.В.** Применение аккумуляторных систем накопления электроэнергии для улучшения условий динамической устойчивости электроэнергетической системы // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XIV МНТК, 1 – 4 октября 2024, Ставрополь. – В 2 т. Т.2. – Ставрополь, СКФУ. – С. 105-108.

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

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В настоящее время на основе информационной модели Единой энергетической системы России осуществляются расчеты и анализ перспективных электроэнергетических режимов. Составление достоверных моделей высоковольтных кабелей, учитывающих различные условия их функционирования, является актуальной задачей.

Предметом исследования являются параметры схем замещения высоковольтных кабелей для моделирования установившихся и переходных режимов.

Целью работы является изучение особенностей учета характеристик кабеля при моделировании с помощью различного программного обеспечения, в частности с помощью программы «PSCAD» [1].

Проведен анализ основных конструкций кабельных линий электропередачи 6-750 кВ [2]. Изучены основные расчетные параметры кабелей (сопротивления и проводимости), а также основные способы заземления экранов [3].

По результатам работы определены основные факторы, которые необходимо учитывать при моделировании кабельных линий.

Направлением дальнейших исследований является более подробное изучение методов осуществления моделирования кабельных линий и использование результатов в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Куликов А. Л., Лоскутов А. А.** Моделирование электроэнергетических систем и алгоритмов РЗ и А в программном комплексе PSCAD: учеб. пособие /А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2021 – 479 с.
2. **Ларина Э. Т.** Силовые кабели и кабельные линии: Учеб. пособие для вузов, –М.: Энергоатомиздат, 1984, 368 с.
3. **Nasser D.** Tleis Power Systems Modelling and Fault Analysis. Theory and Practice. – Oxford: Elsevier, 2008.

*Г.С. Сорокин, студ.; рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г.Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В данной работе представлена математическая модель электроэнергетической системы, состоящей из двух электрических станций, представленных эквивалентными генераторами разной мощности, линии электропередачи сверхвысокого напряжения и общей нагрузки (рис. 1).

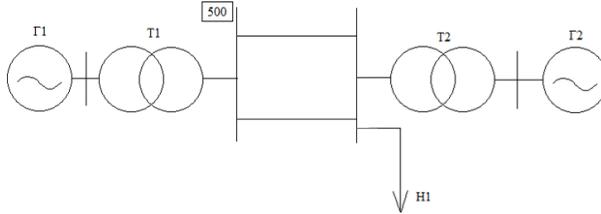


Рисунок 1. Схема исследуемой ЭЭС

Математическая модель исследуемой ЭЭС составлена в программном комплексе Matlab с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах и связи их между собой [1, 2]. Модель позволяет проводить расчеты установившихся режимов и строить угловые характеристики сложной изолированной системы, работающей на общую нагрузку.

С помощью полученной системы уравнений при утяжелении режима по мощности были получены значения взаимного угла между ЭДС эквивалентных генераторов двух электрических станции, и построена угловая характеристика мощности.

Проанализировано влияние длины линии электропередачи на устойчивость системы и предел передаваемой мощности по ЛЭП СВН. В дальнейшем будет рассмотрена модель с управляемым устройством продольной компенсации для изучения вопросов устойчивости, повышения пропускной способности линии электропередачи и выбора закона регулирования управляемого устройства с целью повышения устойчивости изолированной сложной ЭЭС.

Библиографический список

1. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей // Электротехника. 2017. №2. С. 60–66.

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

РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС С ПРИМЕ- НЕНИЕМ ФАЗНОГО КООРДИНАТНОГО БАЗИСА

Создание достоверной модели электроэнергетической системы (ЭЭС) и её элементов является важной задачей для расчётов нормальных и послеаварийных режимов. В рамках учебно-исследовательских расчётов используются отечественные программы «Mustang» и «RastrWin3/RUSTab», в которых возможно создать только однолинейную модель ЭЭС, что затрудняет или делает невозможным расчёты при сложных видах несимметрии, в том числе – при нормативных возмущениях, предписываемых указаниями [1]. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность применения фазного координатного базиса, не накладывающего ограничений на количество и характер точек несимметрии.

Целью работы является создание имитационной модели простейшей ЭЭС с описанием элементов в фазном координатном базисе, а также исследование динамической устойчивости ЭЭС. Верификация всех этапов расчёта осуществляется через программный комплекс «MATLAB/Simulink» и другие специализированные программные продукты, в частности, облачный сервис «Лаборатория РЗА».

На первом этапе исследования сформированы, реализованы в программном коде и протестированы трёхфазные модели источников, линии электропередачи, силового трансформатора и элементов, моделирующих несимметрию. Сформирована и верифицирована матрица узловых проводимостей трёхфазной схемы ЭЭС, а также рассмотрены варианты решения уравнения движения ротора синхронного генератора с представлением машины «классической» моделью $E' = \text{const}$. Дальнейший этап работы является создание комплексной имитационной модели, связывающей соответствующие дифференциальные и алгебраические уравнения в рамках единой итерационной процедуры для анализа динамической устойчивости.

Библиографический список

1. **Методические указания по устойчивости энергосистем.** Утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 г. № 630. – Москва, 2018.

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ

Для моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов (ПП) в синхронном генераторе (СГ) широко применяется полная система уравнений Парка-Горева. Решение этой системы алгебро-дифференциальных уравнений предполагает наличие полноценного состава достоверных паспортных параметров СГ и его систем регулирования, что на практике сопряжено с трудностями технического и юридического характера. В связи с этим возникает вопрос о корректности использования упрощенных моделей СГ, требующих меньшего количества паспортных данных. Ответ на этот вопрос предполагает сопоставление расчётных кривых, полученных по полной системе уравнений и принимаемых за «эталон», и соответствующих результатов по упрощенным соотношениям.

Учитывая изложенное, целью исследования является сравнительный анализ и оценка возможности использования упрощенных математических моделей, описывающих ПП в СГ, с применением программного комплекса «MATLAB/Simulink». На первом этапе работы рассмотрены: а) полная модель СГ; б) две упрощенные модели без учёта демпферных контуров; в) уравнение движения ротора. На рисунке 1 показано, что последняя из перечисленных моделей достаточно точно отражает изменение скорости ротора СГ, если решение соответствующего дифференциального уравнения начинается с отстройкой по времени от начала короткого замыкания (КЗ).

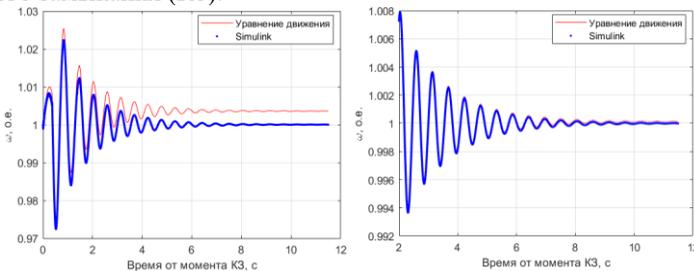


Рисунок 1. Расчётные кривые изменения относительной скорости вращения ротора СГ по полной системе уравнений и по уравнению движения ротора СГ: слева – расчёт от начала КЗ; справа – расчёт от момента времени 2 с

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМОДЕЛИРОВАННЫХ И РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Потенциал технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) для анализа электромагнитных переходных процессов, в частности – сопровождающих короткие замыкания (КЗ), не раскрыт. Отечественные и зарубежные исследования свидетельствуют о перспективности применения данных СВИ в задаче определения места короткого замыкания на воздушных линиях (ВЛ) сверхвысокого напряжения [1]. Вместе с тем наличие синхронизированных векторов, зафиксированных с высокой дискретностью (не менее 50 раз в секунду), потенциально позволяет, помимо локации КЗ, получить дополнительную информацию о параметрах повреждения и питающих систем. Кроме того, синхровекторы, доступные в течение бестоковой паузы в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ), могут быть использованы для анализа характера КЗ (устойчивое или самоустраняющееся).

В настоящей работе поставлены следующие основные задачи:

- расчёт величины переходного сопротивления в режиме однофазного КЗ по данным СВИ с двух сторон ВЛ;
- приблизительная оценка сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей систем, питающих ВЛ, в режиме КЗ;
- анализ характера изменения величины переходного сопротивления в режиме бестоковой паузы ОАПВ и фиксация факта самоустранения КЗ, если таковое оказалось неустойчивым.

Все теоретические положения иллюстрируются с применением имитационного моделирования, а также с использованием реальных данных СВИ, зафиксированных при КЗ на воздушных линиях 500 кВ Единой энергосистемы Российской Федерации.

Библиографический список

1. **Andrey Yablokov, Igor Ivanov, Filipp Kulikov, Andrey Tychkin, Anton Panaschatenko, and Yaroslav Umnov**, “Investigation of fault location based on class M PMUs with simulated and real-field synchrophasors,” *Electric Power Systems Research*, Volume 232, July 2024, 110414. <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2024.110414>.

*А.В. Калашиникова, студ.; рук. И.Е. Иванов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Одной из ключевых задач для поддержания надёжного функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) является обеспечение её динамической устойчивости. Корректное моделирование электромеханических переходных процессов (ПП) при т. н. «больших возмущениях», в частности, регламентированных нормативным документом [1], требует итеративного решения сложной системы уравнений, учитывающей действие систем регулирования синхронных машин и изменение схемно-режимной ситуации (в том числе – возникновение продольно-поперечной несимметрии). В связи с этим в рамках учебного проектирования применяются различные упрощения, обоснованность которых может быть проанализирована с использованием современных средств моделирования, таких как программный комплекс «MATLAB/Simulink».

Целью работы является исследование влияния моделей синхронного генератора (СГ) на конкретные количественные выводы о характере электромеханического ПП, в частности – на расчётные значения предельного времени существования короткого замыкания (КЗ). Рассматриваются три базовые модели СГ: а) полная (с учётом ПП в различных контурах машины) без автоматики регулирования возбуждения (АРВ); б) полная с учётом АРВ; в) упрощенная с постоянством переходной ЭДС. На первом этапе исследования сформирована имитационная модель ЭЭС, реализован алгоритм для автоматизированного изменения параметров КЗ и поиска предельного времени отключения КЗ, а также осуществлено сравнение опций моделирования и выбран вариант «Discrete Phasor».

По результатам работы должны быть сформулированы выводы о корректности применяемых в учебных моделях допущений, а также о влиянии АРВ и, в перспективе, автоматики регулирования скорости вращения турбины СГ, на параметры электромеханического ПП.

Библиографический список

1. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России от 03.08.2018 г. № 630. – Москва, 2018.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗНОГО КООРДИНАТНОГО БАЗИСА

Практические расчёты электроэнергетических режимов, в т. ч. – периодических составляющих напряжений и токов в начальный момент короткого замыкания, принято осуществлять по однолинейным моделям (в частности – с использованием аппарата симметричных составляющих), которые не в состоянии отразить пофазную несимметрию параметров, проявляющуюся на нетранспонированных (частично транспонированных) линиях электропередачи (ЛЭП). Современные средства моделирования в области электротехники и электроэнергетики, например, программные комплексы «MATLAB/Simulink» и «АТР/АТРDraw», позволяют формировать детальные конфигурации системы проводников ЛЭП за счёт применения фазного координатного базиса и модальных составляющих [1]. Соответствующий математический аппарат потенциально может быть использован в задаче определения места повреждения (ОМП) на ЛЭП при наличии двусторонних и многосторонних измерений, что в настоящее время не только достижимо, но и частично реализовано в рамках Системы мониторинга переходных режимов Единой энергосистемы России.

С учётом изложенного, *целью исследования* является разработка математических моделей нетранспонированной ЛЭП и «коридора взаимоиנדукции» ЛЭП, а также расчётных алгоритмов для точного решения задачи ОМП с использованием аппарата модальных составляющих. Реализация всех алгоритмов осуществляется в программном коде на языке «MATLAB», а верификация проводится с применением имитационных моделей в «MATLAB/Simulink» и «АТР/АТРDraw». На первом этапе исследования разработан алгоритм ОМП и выполнен сравнительный анализ его функционирования с использованием модели двухцепной нетранспонированной ЛЭП.

Библиографический список

1. **Dommel H.W.** Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. – Portland, OR, USA: Bonneville Power Administration, 1986.

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЭС РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕЙТРАЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ШР

На примере ЭЭС, содержащей электропередачу 500 кВ, анализируются мероприятия по обеспечению её динамической устойчивости.

В качестве нормативного возмущения рассматривается однофазное КЗ на ВЛ 500 кВ, наиболее часто возникающее на этих линиях. Запас устойчивости при этом оценивается по предельному времени отключения $t_{проткл}$ КЗ, обеспечивающему сохранение синхронного режима ЭЭС.

Математическое моделирование производится с использованием специализированный ПВК.

Для повышения устойчивости ЭЭС применяется заземление нейтралей трансформаторов, как через активные, так и через индуктивные сопротивления. Исследованиями установлена зависимость запаса устойчивости от величины применяемых сопротивлений (рис. 1). При этом выявлена большая эффективность от применения активных сопротивлений.

Исследована также эффективность отключения шунтирующих реакторов (ШР) 500 кВ при КЗ для повышения динамической устойчивости. В отличие от заземления нейтралей трансформаторов через сопротивления, данное мероприятие может быть эффективным не только при КЗ, связанных с землёй, но и при отсутствии токов нулевой последовательности.

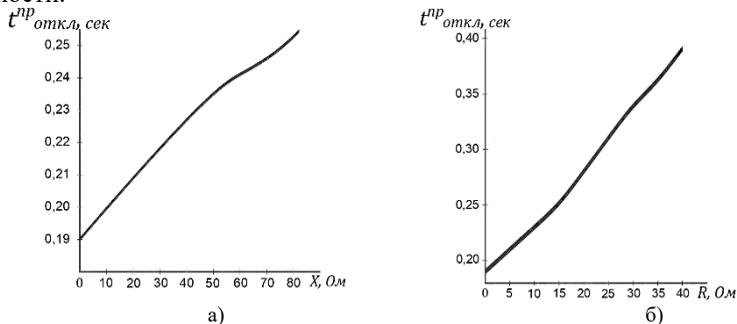


Рисунок 1. Время предельного отключения КЗ: а) – при установке индуктивных сопротивлений в нейтрали трансформаторов; б) – при установке активных сопротивлений в нейтрали трансформаторов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С ГОЛОЛЁДНЫМИ ОБЛЕДЕНЕНИЯМИ НА ЛЭП

Проблемы, связанные с предотвращением аварий из-за гололёда в электрических сетях, актуальны для различных регионов России и других стран. Увеличение протяженности линий электропередач (ЛЭП) за счет введения новых участков, включая те, что находятся в зонах с высокими рисками гололёда, приводит к возрастанию числа аварийных отключений электроэнергии в осенне-зимний период.

Сильные нагрузки от гололёда могут вызывать серьезные сбои в работе воздушных линий электропередачи. К таким сбоям относятся колебания проводов, разрушение опор и проводов, перегрузка и повреждение траверс, гирлянд изоляторов и арматуры.

Несмотря на разрушительное воздействие гололёдообразования, его последствия не всегда фатальны. Для предотвращения и устранения аварий, вызванных гололёдом, применяется комплекс мероприятий по улучшению технического состояния сетей электроснабжения.

В ходе работы было проведено математическое моделирование процессов плавки гололёда. Оно позволило нам: рассчитать оптимальный ток и время для качественного и энергоэффективного процесса. А также проверить прочность, стрелу провеса, напряженно-деформированное состояние под нагрузками, оптимизировать геометрию.

Полученная математическая модель верна и будет использована в магистерской выпускной квалификационной работе для расчета параметров линий и тока плавки.

Библиографический список

1. **Диагностика**, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сапук: учеб. пособие / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. – 494 с.

*А.А. Кузнецов, студ.; рук. Д.Н. Кормилицын, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНЕНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С УСТРОЙСТВОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ

Исследование режимов электроэнергетических систем производится на различных математических моделях с целью выявления возможности их реализации на практике [1], а также для установления оптимальных значений настроечных характеристик регулируемых элементов, например, таких как устройства продольной компенсации. Немаловажным фактором также является граница области применимости конкретной математической модели электрооборудования.

Работа направлена на сравнение различных подходов к математическому описанию элементов энергосистемы, с целью выявления возможности их применения для расчета установившихся режимов работы энергосистемы. Исследуется влияние выбора модели на точность расчетов, а также на эффективность управления режимами работы энергосистемы.

Рассматриваемая система содержит один эквивалентный блок генератор-трансформатор, соединенный с системой – шиной бесконечной мощности через управляемую ЛЭП, длиной 126 км на напряжении 220 кВ. Наличие шин бесконечной мощности исключает появление режимов с самопроизвольным снижением напряжения. Элементы сети в основной модели представляются в системе координат d-q, в альтернативной модели элементы энергосистемы представляются эквивалентными четырехполюсниками.

Учитывая сложность и многообразие современных энергетических систем, математическое моделирование в значительной мере позволяет проводить различные вычислительные эксперименты по выявлению предельной передаваемой мощности, в том числе в системах с такими регулируемыми устройствами как устройства продольной компенсации.

Библиографический список

1. **Идельчик В.И.** Электрические системы и сети: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

*А.А. Недвига, студ.; рук. Д.Н. Кормилицын к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УПРАВЛЯЕМЫМ УСТРОЙСТВОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Применению управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) в современной электроэнергетике уделяется все большее внимание, поскольку экономически целесообразно повышать пропускную способность воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) путем придания линиям свойств управляемых линий, а не строительством дополнительных параллельных линий, влекущих за собой такие проблемы, как отчуждение больших участков земли под трассу линии и повышение значения напряжения по длине линии в режимах, приближенных к холостому ходу и др. [1].

Однако при установке УУПК на линии необходимо учитывать распределение напряжения по ней, а именно, находится ли оно в допустимых пределах от номинального. Целью данной работы является анализ распределения напряжения вдоль линии 220 кВ, разделенной на 4 участка, с установленным после нее УУПК. Разработка данной модели реализована на языке с++ в программном комплексе Microsoft Visual Studio [2].

В ходе исследования получены зависимости напряжения на концах каждого участка от угла ротора генератора в градусах. Напряжение при этом находится в допустимых пределах. График полученной зависимости напряжения от угла имеет вид параболы при малых значениях угла, после чего принимает вид практически линейной кривой с небольшой вогнутостью. Экспериментально получено, что при увеличении длины линии график напряжения от угла имеет вид параболической кривой при большем значении углов.

Библиографический список

1. Кощеев Л.А., Шлайфштейн В.А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети // Электрические станции. – №12. – 2005. – (23) выпуск 3, 2007. – С. 30 – 38.
2. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Моделирование режимов электроэнергетических систем с управляемыми элементами // Учебное пособие – Иваново, 2016.

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

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЭП ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ FACTS

Основными техническими проблемами развития современных электроэнергетических систем являются проблемы повышения пропускной способности электропередач, управления режимами энергосистем, обеспечения статической и динамической устойчивости, снижения потерь мощности и энергии, уменьшения экологического влияния, сокращения полосы отчуждения земельных угодий под строительство линий электропередач [1]. Управляемые (гибкие) передачи переменного тока (FACTS) являются одним из наиболее эффективных средств для решения этих задач.

К числу устройств FACTS относятся управляемые установки продольной компенсации (УУПК), которые способны изменять свои параметры в зависимости от режима работы электропередачи.

Применение устройств продольной компенсации при всех своих преимуществах по увеличению предела передаваемой мощности и устойчивости системы имеет недостаток в виде большого перепада напряжений на выводах УУПК, что в ряде режимов приводит к недопустимым перенапряжениям. Для решения данной проблемы на выводах УУПК устанавливают шунтирующие реакторы [2].

В ходе исследования были рассмотрены режимы работы электропередачи 500 кВ до и после установки УПК. Анализ показал, что УПК позволило увеличить пропускную способность и обеспечить требуемый запас по статической устойчивости в 20%.

Библиографический список

1. Тухватуллин М.М., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Урманова Ф.Ф. «Анализ современных устройств facts, используемых для повышения эффективности функционирования ЭЭС России»: [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-ustroystv-facts-ispolzuemyh-dlya-povysheniya-effektivnosti-funktsionirovaniya-el-ektroenergeticheskikh-sistem/viewer> (Дата обращения 19.12.2023).
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.

*Я.А. Умнов, асп.; рук. И.Е. Иванов, к.т.н.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЛЭП СВН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ СВИ

Параметры схем замещения (ПСЗ) воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) используются при решении многих задач электроэнергетики, например, расчеты режимов и анализ устойчивости энергетической системы, определение места повреждения ВЛЭП, расчет уставок дистанционной защиты и т. д. Паспортные параметры линий, вследствие методических погрешностей их расчета, могут отличаться от фактических, которые, к тому же, могут претерпевать существенные изменения в процессе эксплуатации линий [1]. Указанные факторы обуславливают актуальность задачи идентификации ПСЗ ВЛЭП.

В последнее время внимание исследователей в данной области направлено на применение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ). Разработано множество соответствующих алгоритмов идентификации ПСЗ ВЛЭП. Эффективность функционирования большинства разработанных алгоритмов протестирована исключительно на основе лабораторных и компьютерных экспериментов.

Данная работа посвящена сравнительному анализу эффективности функционирования ряда алгоритмов идентификации ПСЗ ВЛЭП, которые можно разбить на три группы:

- 1) алгоритмы, представленные в опубликованных исследованиях;
- 2) альтернативные формулировки алгоритмов первой группы;
- 3) новые, самостоятельно разработанные алгоритмы.

Эффективность функционирования исследуемых алгоритмов оценивается не только по данным, полученным с помощью математического моделирования, но и по данным СВИ, зафиксированных по концам ВЛЭП сверхвысокого напряжения, входящих в состав Единой энергетической системы Российской Федерации. Результаты исследований позволили выявить как наиболее перспективные, так и принципиально неработоспособные алгоритмы.

Библиографический список

1. **Иванов И.Е.** Анализ степени вариации параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 12. – С. 95–100.

*О.С. Суханова, студ.; рук. В.П. Голов, к.т.н.;
рук. Д.Н. Кормилицын, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННОЙ ДВУХМАШИННОЙ СИСТЕМЫ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Исследование статической устойчивости электроэнергетических систем является одной из ключевых задач в области электроэнергетики в условиях усложнения структуры современных энергосистем и увеличения доли управляемых элементов [1]. В данной работе рассматривается математическая модель двухмашинной системы с управляемым устройством продольной компенсации (УУПК), установленным в середине линии электропередачи 500 кВ. Данная модель позволяет анализировать статическую аperiodическую и колебательную устойчивость, что представляет значительный интерес для понимания взаимного влияния нескольких источников генерации.

В ходе исследования построены угловые характеристики активной мощности генераторов при различных настройках УУПК, которые позволяют оценить влияние регулируемых параметров УУПК на передаваемую мощность и статическую устойчивость системы. Полученные результаты сопоставлены с характеристиками нерегулируемой компенсации, что позволило наглядно продемонстрировать преимущества регулируемого устройства.

Кроме того, для более детального анализа влияния УУПК на устойчивость системы, результаты, полученные на двухмашинной модели, были сопоставлены с данными, рассчитанными на одномашинной системе с аналогичными настройками УУПК. Это сравнение позволило выявить ключевые различия в поведении систем. В частности, двухмашинная модель демонстрирует более сложную динамику взаимодействия генераторов, что делает её более приближенной к реальным условиям эксплуатации.

Библиографический список

1. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения учебник для вузов/ Ю.П. Рыжов. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. — 488 с.: ил.

СЕКЦИЯ 13
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

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

Секретарь – ассистент **Титов В.А.**

А.А. Пестерев, асп.; рук. С.С. Костинский, к.т.н., доц.
(ЮРГПУ(НПИ), г. Новочеркасск)

СНИЖЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ СУММАРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ТОКА В СЕТИ 0,4 кВ ЗА СЧЕТ ВЗАИМОКОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

В настоящее время электрические сети с номинальным напряжением 0,4 кВ эксплуатируются в условиях наличия значительного количества электроприемников, имеющих нелинейный характер нагрузки, что приводит к появлению в указанных сетях несинусоидальности. На практике, для снижения несинусоидальности в распределительных сетях 0,4 кВ применяют фильтры высших гармоник (ВГ), что требует ощутимых капитальных вложений, поэтому указанное мероприятие имеет достаточно долгий срок окупаемости.

Одним из рациональных решений, для снижения несинусоидальности в распределительных сетях 0,4 кВ, не требующим ощутимых капиталовложений, может быть снижение несинусоидальности за счет взаимокompенсации ВГ токов, путем распределения по фазам однофазных электроприемников, имеющих линейный и нелинейный характер. Взаимокompенсация токов ВГ осуществляется за счет ослабления и неоднородности линейных и нелинейных электроприемников, подключенных к фазам.

В ходе экспериментального исследования, выполненного при распределении однофазных офисных линейных и нелинейных электроприемников, были построены гистограммы амплитудных спектров ВГ тока по фазам сети (рис. 1).

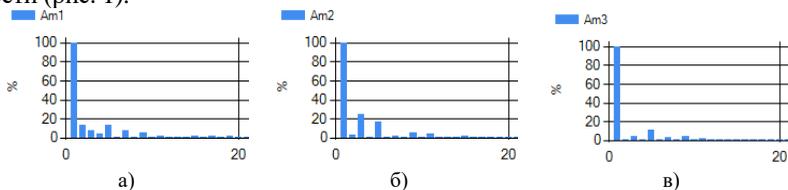


Рисунок 1. Гистограммы амплитудных спектров ВГ тока по фазам: а) – фаза 1; б) – фаза 2; в) – фаза 3.

Значение суммарного коэффициента гармонических искажений THD_i при распределении однофазных офисных линейных и нелинейных электроприемников по фазе 1 составило 20,76 %, по фазе 2 – 38,63 %, а по фазе 3 – 14,7 %.

А.А. Пестерев, асп.; рук. С.С. Костинский, к.т.н., доц.
(ЮРГПУ(НПИ), г. Новочеркасск)

МИНИМИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ОБОРУДОВАНИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕСИММЕТРИЕЙ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬЮ НАГРУЗКИ

В настоящее время современные системы электроснабжения (СЭС) эксплуатируются в условиях наличия значительного количества нагрузки, имеющей нелинейный и несимметричный характер. На практике для снижения дополнительных потерь в СЭС, обусловленных несимметрией, прибегают к симметрированию нагрузок по фазам сети, а для обусловленных несинусоидальностью, к фильтрации высших гармонических составляющих (ВГС) тока.

Одним из средств не требующим капиталовложений, для минимизации дополнительных потерь в оборудовании СЭС, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью, является разработанная программа, использующая эвристический генетический алгоритм для распределения по фазам однофазных линейных и нелинейных электроприемников [1].

В ходе экспериментального исследования, выполненного при распределении однофазных офисных линейных и нелинейных электроприемников, был построен график (рис. 1), отражающий изменение мгновенных значений силы тока, потребляемой электроприемниками, распределенными по фазам линий L_1, L_2, L_3 .

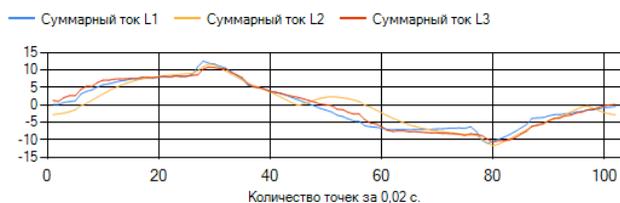


Рисунок 1. График мгновенных значений силы тока электроприемников, распределенных по фазам линий L_1, L_2, L_3

Оценка дополнительных потерь мощности показала, что в ходе распределения по фазам линий L_1, L_2, L_3 однофазных электроприемников и дальнейшей эксплуатации СЭС, потери от несимметрии нагрузки составили 1,22 Вт, потери от несинусоидальности – 0,72 Вт, а общие дополнительные потери от несимметрии и несинусоидальности – 1,94 Вт.

*А.В.Борисова; Р.Е. Первенёнок; рук. А.Л.Сицко, к.т.н., доц.
(Военная академия Республики Беларусь, г. Минск)*

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ

Низкое качество электрической энергии оказывает отрицательное влияние на электрооборудование: снижается коэффициент полезного действия оборудования, растут потери электроэнергии при транспортировке в электросетях, возникают сбои в электроснабжении.

В [1] отмечается, что основные источники ухудшения качества электроэнергии находятся на уровне распределительных сетей и конечных потребителей. Значительное влияние на качество электроэнергии оказывают устройства распределенной генерации и системы резервного электропитания. Конечные потребители, в состав которых входят элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой – это персональные компьютеры, офисное оборудование, системы освещения с энерго-сберегающими источниками света и электроприводы с регулируемой скоростью вращения.

Наиболее перспективным устройством повышения качества электрической энергии является применение параллельных силовых активных фильтров гармоник (АФГ). На сегодняшний день существует большое количество способов управления АФГ. В последние годы значительное внимание уделяется разработке способов управления АФГ, основанных на использовании нейронных сетей и цифровой обработки сигнала.

Результаты проведенных исследований имитационной модели АФГ с адаптивной системой показали, что при подключении АФГ коэффициент гармоник тока составляет (ТНД) 2,18 %, до включения АФГ ТНД = 24,36%, что говорит об эффективности применения адаптивного способа управления АФГ.

Библиографический список

1. **Аррилага, Дж.** Гармоник в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.: пер. с англ. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

На сегодняшний день повышение энергоэффективности промышленных предприятий является одной из приоритетных задач в области электроэнергетики [1]. Основными потребителями электроэнергии (ЭЭ) на промышленных предприятиях являются асинхронные электродвигатели (АД). Они потребляют порядка 70% объема ЭЭ, поэтому при анализе системы электроснабжения промышленного предприятия в первую очередь следует оценить возможность повышения энергоэффективности АД. Известно, что при появлении в двигателе различных дефектов, потери ЭЭ в нем увеличиваются [2].

Целью работы является анализ возможности снижения потерь ЭЭ при эксплуатации АД за счет раннего выявления дефектов с помощью диагностики на основе спектрального анализа тока статора и внешнего магнитного поля машины в режиме реального времени.

В работе решаются следующие задачи:

1. Разработка математической модели АД на основе типа двигателя и его рабочей машины.
2. Расчеты математической модели АД и получение сигналов тока статора и внешнего магнитного поля.
3. Анализ полученных сигналов.

Направлением дальнейших исследований является математическое моделирование исправных и поврежденных электродвигателей, оценка объемов перерасхода электроэнергии вследствие наличия дефектов и использование результатов в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Федеральный закон** «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 N 261-ФЗ.
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.

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

СОЗДАНИЕ ПСЕВДОИЗМЕРЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Наблюдаемость распределительных сетей 6-10 кВ серьезная проблема современной электроэнергетики. Сегодня общая наблюдаемость распределительных сетей не превышает в среднем 30%, что связано с малой степенью обвязки интеллектуальными приборами учета электроэнергии и оперативно-информационными комплексами. Передача данных интеллектуальными приборами может быть запаздывающей до 48 часов, что не позволяет отслеживать параметры режимов работы сетей в реальном времени. Уменьшить остроту проблемы возможно путем использования псевдоизмерений (измерений тока, напряжения и мощности, полученных расчётными методами или на основе статистических данных). Создание псевдоизмерений позволит в реальном времени иметь информацию о распределительной сети. Существует множество вариантов создания псевдоизмерений, одним из которых является использование методов машинного обучения для прогнозирования значений мощности нагрузки на основе ретроспективных данных. Спрогнозированные профили нагрузки могут использоваться в имитационной модели распределительной сети с целью определения недостающих значений токов и напряжений путем расчета установившегося режима.

В докладе будет представлено решение задачи повышения наблюдаемости распределительной сети путем создания псевдоизмерений. Была реализована многофакторная модель машинного обучения для прогнозирования мощности нагрузки и программный код для расчета токов и напряжений на имитационной модели. Проверка работоспособности представленного подхода была выполнена на модели участка реальной сети с использованием данных интеллектуальных приборов учета электроэнергии. Средняя относительная ошибка между реальными и расчетными данными составила 5,3%, коэффициент детерминации 0,93, что доказывает высокую степень воспроизведения режимов при создании псевдоизмерений мощности.

*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)*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДЛЯ ПОКУПКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ РЫНКА НА СУТКИ ВПЕРЕД

Объемы электроэнергии, не покрываемые регулируемыми договорами, реализуются по нерегулируемым ценам в рамках свободных договоров, рынка на сутки вперед (РСВ) и балансирующего рынка (БР). При заключении свободных договоров участники рынка самостоятельно определяют контрагентов, цены и объемы поставки электрической энергии [1].

Целью работы является создание и верификация модели нейросети для прогнозирования электрических нагрузок. Благодаря созданным алгоритмам машинного обучения возможна экономия материальных ресурсов. Еще одним эффектом от точного прогнозирования является уравнивание потребления и генерации электрических мощностей (обеспечение баланса мощностей), что приводит к более корректному режиму работы сети. В случае отклонения от равновесной цены (точка пересечения заявок потребителей и генерации) на $\pm 5\%$ возможна экономия до 20% по сравнению с тарифом, где оплата происходит за фактически потребленную электроэнергию.

На основе статистических данных модель машинного обучения может с достаточной точностью прогнозировать потребляемую мощность. Для этой цели разработана модель нейросети, точность которой составила порядка 95%.

Созданная модель была верифицирована в программно-аппаратном комплексе RTDS, с использованием симулятора, работающего в масштабе реального времени. По результатам проведенной апробации модели, удалось подтвердить достаточную точность прогнозирования мощностей. Общее отклонение нагрузки в узле питания не превышает значения 10%.

Библиографический список

1. **Постановление** Правительства РФ от 27.12.2010 N 1172 (ред. от 01.11.2024) «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности».

*А.С. Ужакин, студ.; рук. Сорокин А.Ф., к.т.н., доц.,
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Повышение энергоэффективности и энергосбережения являются одними из ключевых направлений модернизации отечественной экономики. Рациональное использование энергоресурсов является задачей первостепенной важности, поскольку существует потенциальная выгода от их экономии, исчисляемая в миллиардах и даже в триллионах рублей в год [1].

В связи с актуальностью проблемы проведен анализ современного трансформаторного оборудования систем электроснабжения напряжением 6-10 кВ, которое представлено ведущими производителями в этой сфере, с целью выбора наилучших технико-экономических решений.

Выполнены сравнительные расчеты использования трансформаторов марки ТМГЭ35, ТМГЭ2 и ТМГ одинаковой мощности. Трансформатор ТМГЭ35 наиболее дорогой из этой группы, но имеет более низкие значения потерь холостого хода и короткого замыкания. В результате получено, что при оптимальной загрузке трансформаторов за счет экономии на издержках, обусловленных стоимостью потерь электроэнергии в трансформаторах, дополнительные капиталовложения окупятся в течение одного года эксплуатации.

Таким образом, установка энергосберегающего силового трансформатора способствует экономии денежных средств предприятия. За жизненный цикл силового оборудования предприятие может вывести прибыль почти в 2 миллиона рублей [2].

Направлением дальнейших исследований является анализ энергоэффективности использования компенсирующих устройств.

Библиографический список

1. **Копытов Ю.В., Чуланов Б.А.** Экономия электрической энергии в промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1982 г. – 115 с.
2. **Расчет трансформаторов:** Учеб. пособие для вузов. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 528 с.: ил.

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

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РАЙОНА ГОРОДА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Одной из основных причин сооружения объектов распределенной генерации (РГ) в городе является ограничение на подключение новых районов потребителей к существующим распределительным сетям при увеличении мощности присоединенной нагрузки [1].

Технические решения по интеграции объектов РГ в распределительные сети должны опираться на результаты анализа расчетов установившихся режимов с участием объектов РГ [2].

Цель работы. Анализ результатов расчета установившихся режимов электрической сети нового района города с мини ТЭЦ.

Установлено, что на мини ТЭЦ планируется установка шести генераторов с единичной мощностью 1750 кВт·А на напряжении 10,5 кВ.

Проведены расчеты основных установившихся режимов наибольших и наименьших нагрузок электрической сети с применением ПК «СИМЭС»:

- параллельная работа объекта РГ с ЭЭС;
- изолированная работа объекта РГ (автономный режим).

Выявлены особенности режимов работы РГ с учетом ограничения передачи мощности от существующей подстанции ЭЭС в новый район 5500 кВт.

Результаты работы использованы в разрешении сооружения мини ТЭЦ в новом районе города и в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Воропай Н. И.** Распределенная генерация в электроэнергетических системах // Матер. Междунар. научно-практической конф., «Малая энергетика-2005», 2005.
2. **Гуревич Ю.Е.** Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. - Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. -280 с.

*М.С. Горбашкова, студ.; рук. А.Ф. Сорокин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАСЧЕТ УРОВНЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА

Проблема качества электрической энергии в системах электроснабжения продолжает оставаться одной из важнейших, определяющих надежность и эффективность электроснабжения потребителей. Одной из основных ее составных частей является проблема наличия высших гармоник в сети, так как в последние годы значительное распространение получили электропотребители, вольт-амперные характеристики которых нелинейны.

Объектом исследования является система электроснабжения производственного участка, содержащая пассивную нагрузку и электрическую печь сопротивления мощностью 150 кВт. Предметом исследования являются высшие гармоники напряжения.

Для проведения в ЭПС процессов, требующих поддержания заданной температуры, необходима установка тиристорного регулятора напряжения. Высшие гармоники тока, потребляемые тиристорным регулятором, вызывают нелинейное искажение напряжения сети.

Целью расчета несинусоидальности напряжения является определение коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{НС}$ и сравнение его с нормативным показателем [1].

В результате расчетов установлено, что $K_{НС}$ достигает 12,66 %, что превышает нормально-допустимое значение 8 %.

Для уменьшения коэффициента несинусоидальности в системе электроснабжения предприятия выбрано фильтрокомпенсирующее устройство с параметрами $X_{C(1)} = 0,5186308$ Ом, $X_{L(1)} = 0,0207452$ Ом. В результате установки ФКУ $K_{НС}$ снижается до 1,095 %.

Направлением дальнейших исследований является моделирование схемы с источником высших гармоник в программном комплексе Simulink и использование результатов в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Апаничева, С.С.** Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 109 с.

*В.С. Губернаторова, студ.; рук. А.Е. Аржанникова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА НАПРЯЖЕНИЯ 0,95 кВ

Решением Технического совета ПАО «Россети» принято считать целесообразным рассматривать строительство распределительной сети 0,95 кВ в населенных пунктах с плотной жилой и отдаленной коттеджной застройкой [1].

Произведен анализ влияния увеличения нагрузки на величину потерь электроэнергии и на величину стоимости услуг по передаче электроэнергии для двух вариантов схем электроснабжения: в сети 10/0,38 кВ и в комбинированной сети 10/0,95/0,38 кВ.

Проведенные исследования показали, что с увеличением мощности нагрузки свыше 60 % номинальной величины потери энергии при напряжении 0,95 кВ будут ниже, чем при напряжении 0,38 кВ. Наибольшая эффективность будет достигнута при номинальной мощности нагрузки для напряжения 0,95 кВ. При относительной величине нагрузки менее 60 % применение напряжения 0,95 кВ становится неэффективным. Также было выявлено, что увеличение нагрузки возможно до 130 % по отношению к исходному значению.

Полученные результаты работы могут быть использованы при дальнейшем исследовании эффективности применения системы напряжения 0,95 кВ и подготовке магистерской выпускной квалификационной работы.

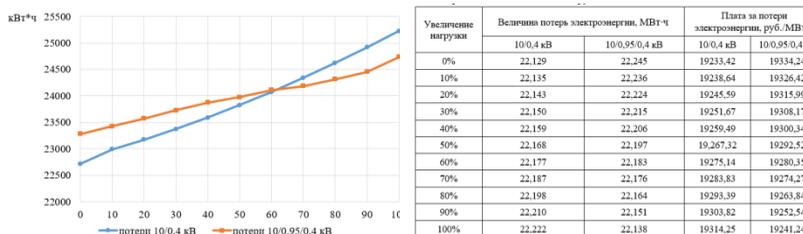


Рисунок 1. Зависимость изменения потерь и изменение стоимости услуг по передаче электроэнергии по вариантам схемы при изменении величины нагрузки

Библиографический список

- СТО 34.01-21.1-001-2017 «Распределительные электрические сети напряжением 0,4-110 кв. Требования к технологическому проектированию»

СЕКЦИЯ 14

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

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

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

*А.В. Глазырин, Д.В. Николаев, Е.С. Воробьев;
рук. В.Я. Васильева, к.т.н, доц.
(ЧГУ, г. Чебоксары)*

АНАЛИЗ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ DEDUCTOR

Объектом исследования является аналоговый сигнал, содержащий 1-ую, 3-ью гармоники и аperiodическую составляющую, который генерируется блоком, разработанным авторами. Сигнал имеет жестко прописанные параметры – частота основной и третьей гармоник, а остальные параметры – варьируемые [1].

На первом этапе исследования была произведена подготовка данных – разбиение данных по колонкам в программе. Затем была произведена статистика загруженных данных. По результатам была произведена проверка качества данных.

Затем был произведен корреляционный анализ - данные имеют нелинейную зависимость, что логично, поскольку данные были получены при помощи программы-рандомайза. После была произведена проверка качества полученных данных со стандартными настройками методов определения выбросов и экстремальных значений (стандартное отклонение от среднего, выбросы – 3,0; экстремальное значение 5,0). Все данные были «пригодны».

На основе полученных данных была построена нейронная сеть в Deducitor. Были получены данные о процессе обучения нейронной сети, ее граф, оценка качества полученной модели и таблица сопряженности.

Из анализа результатов получили, что обученная нейросеть распознает 61% режимов.

По результатам исследования можно отметить, что нейронные сети являются достаточно эффективным средством для анализа и решения задач. Следует отметить, что получение достаточного количества данных для построения нейронной сети, работающей во всех необходимых условиях, может потребовать значительное время.

Библиографический список

1. **Воробьев, Е. С.** Распознавание сигнала адаптивным фильтром с распределенной структурой / Е. С. Воробьев // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы XIII всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 361-365.

*А.В. Глазырин, Д.В. Николаев, Е.С. Воробьев;
рук. В.Я. Васильева, к.т.н, доц.
(ЧГУ, г. Чебоксары)*

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В PYTHON ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Обучение нейронной сети в Python состоит из нескольких этапов – подготовка данных и их обработка, построение сети и ее обучение, оценка на тестовом наборе и развертывание модели на новых данных.

При подготовке данных была произведена очистка данных от пропущенных значений и выбросов. Получившиеся данные были разделены на обучающий набор, по которому происходит обучение, и тестовый – по которому происходит оценка обучения [1].

После подготовки данных были определены количество слоев нейронной сети и функции активации, количество нейронов в слоях.

В ходе обучения нейронной сети модель настраивает свои веса и смещения на основе входных данных для минимизации функции потерь. Оценка обучения производилась на тестовом наборе данных при помощи расчета среднеквадратичной ошибки.

После обучения и оценки модели можно прогнозировать новые данные, интегрировав модель, например, во вспомогательное ПО.

Были подготовлены уравнения сигналов, которые считались входными данными модели. Частота основной гармоники, частота дискретизации, количество отсчетов заданы заранее, остальное варьировалось.

Выходными данными является функция одной переменной, поэтому для создания архитектуры обучения был использован многословный перцептрон.

Получившаяся модель прогнозирует характеристики исходного сигнала. Для оценки работы модели была вычислена среднеквадратичная ошибка для тестовых и обучающих данных. Среднеквадратичная ошибка на тестовой выборке составила 0,003, на обучающей выборке - 0,002.

Библиографический список

1. **Воробьев, Е. С.** Распознавание сигнала адаптивным фильтром с распределенной структурой / Е. С. Воробьев // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы XIII всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 361-365.

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

ГРУППОВОЙ МЕТОД ДОМП НА ОСНОВЕ ЛЕСА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Погрешность методов дистанционного определения места повреждения (ДОМП) зависит от множества факторов, таких как переходное сопротивление, удаленность короткого замыкания, схемно-режимная ситуация и т. д. Эксплуатирующий персонал не имеет возможности выбрать наиболее точный метод ДОМП в зависимости от параметров аварийного режима в реальном времени. Нормативно-техническая документация [1] рекомендует использовать усреднение результатов нескольких методов ДОМП. Однако такой подход может привести к значительной погрешности, поскольку могут усредняться результаты методов ДОМП с существенной ошибкой определения места повреждения. Развитие цифровых технологий позволяет создавать централизованные системы, на основе которых появляется возможность реализации множества методов ДОМП совместно с методами машинного обучения, позволяющими подбирать наиболее точные методы ДОМП для конкретной схемно-режимной ситуации.

В работе были поставлены и решены задачи анализа методов ДОМП, разработки модели машинного обучения для выбора методов ДОМП и реализации алгоритма взвешенного усреднения результатов ОМП множества методов ДОМП с использованием модели машинного обучения. Произведен анализ влияния различных факторов на максимальную погрешность методов ДОМП. На основе проведенного анализа были подготовлены выборки данных для модели машинного обучения. Исходными данными стали СВИ токов и напряжений с двух сторон, симметричные составляющие токов и напряжений, которые разделены на обучающую, проверочную и тестовую выборки. Определена эффективность разработанных подходов ДОМП. Приведённая погрешность выбранных односторонних методов ДОМП в 91% случаев составляет не более 2,5%, а двусторонних методов — в 90% случаев не более 1% на исследуемой модели сети.

Библиографический список

1. **Методические** указания по определению мест повреждений ВЛ напряжением 110 кВ и выше. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС», 2016. СТО 56947007.29.240.55.224-2016.

*А.А. Зимичева; рук. В.А. Шуин, д.т.н., профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СМЕШАННЫХ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Практически все воздушные распределительные сети и значительная часть (около 80%) кабельных сетей напряжением 6–10 кВ работают с изолированной нейтралью. Наиболее опасной разновидностью ОЗЗ в таких сетях являются дуговые перемежающиеся замыкания (ДЗЗ), сопровождающиеся опасными перенапряжениями с кратностью $k_{\pi} = u_{\max}/U_{ф.н}$ до $3,5 \div 4$.

В распределительных сетях 6–10 кВ промышленного и пригородного назначения, кроме воздушных и кабельных линий (ВЛ и КЛ), достаточно часто применяются комбинированные кабельно-воздушные линии (КВЛ). Исследование на имитационной модели сетей 6÷10 кВ, имеющих в своем составе КВЛ, показали, что в точках соединения ВЛ и КЛ и в конце таких линий кратность перенапряжений при ДЗЗ может достигать значений $4,5 \div 5$ и более.

Известно, что для ограничения дуговых перенапряжений, в зависимости от величины $I_{сз}$, в сетях 6–10 кВ применяются резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), высокоомное резистивное заземление нейтрали или комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор. В сетях, имеющих в своем составе только ВЛ или КЛ, указанные способы заземления нейтрали обеспечивают снижение кратности перенапряжений до безопасного для сети уровня $k_{\pi} \approx 2,2 \div 2,4$ [1]. Однако на КВЛ кратность перенапряжений при ДЗЗ может достигать значений до $\sim 2,7 \div 2,8$, что считается опасным уровнем [2].

Таким образом, при наличии в составе распределительной сети 6–10 кВ КВЛ возникает необходимость в применении дополнительных мер для ограничения дуговых перенапряжений при ОЗЗ.

Библиографический список

1. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. **Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений /Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.:** Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 212 с.

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

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ УРЗА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ КЗ С НАСЫЩЕНИЕМ ТТ

Современные требования к выполнению систем РЗА [1] предполагают обеспечение их правильной работы не только в установившихся, но и в переходных режимах КЗ. Проверка правильности работы УРЗА может быть выполнена сравнением времени до насыщения магнитопровода ТТ и требуемого УРЗА времени точной трансформации тока или моделированием работы УРЗА и ТТ. Методики поиска требуемого для УРЗА времени точной трансформации тока и подходы к проведению испытаний с моделированием широко не представлены в научно-технической литературе, в связи с чем актуальна разработка методик тестирования УРЗА с учетом их работы в переходных режимах КЗ.

Разработанная методика предполагает проведение многофакторного исследования с варьированием параметров разработанной имитационной модели ТТ, режима КЗ, уставок УРЗА и других параметров – необходимый перечень, шаг и диапазоны такого варьирования были исследованы и обоснованы при выполнении работы. Используя разработанную методику, можно установить граничное значение требуемого времени точной трансформации тока, необходимое для корректной работы УРЗА при внутренних и внешних КЗ. Дополнительно, используя реальные эксплуатационные параметры ТТ и УРЗА, можно установить правильность его работы при наихудших возможных условиях КЗ в месте его установки, посредством воспроизведения полученных с использованием моделей ТТ осциллограмм на имитационной или физической модели УРЗА. Данный способ тестирования является более точным, чем сопоставление времени до насыщения магнитопровода ТТ и времени точной трансформации тока, поскольку позволяет учесть форму кривой сигнала вторичного тока (степень его искажения). В работе описаны способы технической реализации такого тестирования, в том числе для устройств, уже находящихся в процессе эксплуатации. Разработанная методика была запрограммирована и успешно апробирована при тестировании быстродействующих функций УРЗА производства АО «РАДИУС Автоматика».

Библиографический список

1. **Постановление** Правительства от 13.08.2018 г. № 937 «Об утверждении правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

*Б.Р. Сорокин, П.В. Ширяева, студ.; рук. Г.А. Филатова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В СЕРВИСЕ «ЛАБОРАТОРИЯ РЗА»

Имитационное моделирование широко применяется в задачах электроэнергетики, в частности, для расчетов токов короткого замыкания (КЗ). Известно множество программных комплексов отечественной и зарубежной разработки, например, Matlab+Simulink, PSCAD, RSCAD RTDS, СИМЭС, однако использование облачных сервисов является более актуальным. Поэтому для разработки модели сети электроснабжения промышленного предприятия был выбран сервис «Лаборатория РЗА» [1].

В сервисе была реализована сеть 10 кВ, содержащая воздушные и кабельные линии, трансформаторы, токоограничивающие реакторы, генераторы малой мощности, синхронные и асинхронные электродвигатели (рис. 1). Рассчитывались токи установившегося режима КЗ для расчета параметров срабатывания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА).

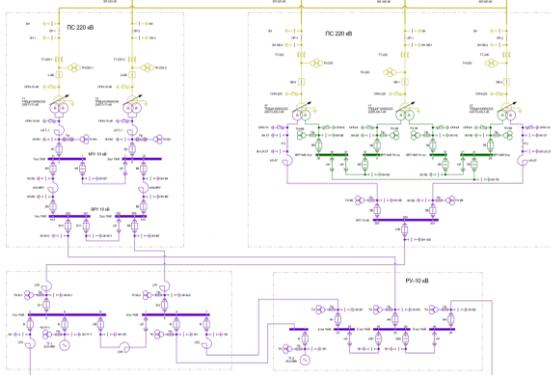


Рисунок 1. Однолинейная схема участка сети

Также рассмотрены особенности выбора уставок дистанционной защиты от междуфазных КЗ для кабельной линии 10 кВ с двухсторонним питанием. Рассмотрены возможные положения вектора сопротивления при режимах самозапуска, с упрощенным расчетом процесса.

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.

*И.А. Потемкин, маг. А.В. Панащатенко, асп.;
рук. Г.А. Филатова, к.т.н., доц., (ИГЭУ), С.Е. Бобров, к.т.н., рук.
обособл. подразделения АО "РАДИУС Автоматика" в г. Иваново*

ВЕРИФИКАЦИЯ ВРЕМЕНИ ТОЧНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ТОКА, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ КОРРЕКТНОЙ РАБОТЫ УРЗА

Функции защиты современных устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) производства АО «РАДИУС Автоматика» разрабатываются с учётом обеспечения правильной работы в переходных режимах коротких замыканий (КЗ), сопровождающихся насыщением трансформаторов тока (ТТ). Алгоритмы функционирования были протестированы с использованием разработанной методики, основанной на применении имитационных моделей ТТ и УРЗА [1]. Полученные по методике значения требуемого времени точной трансформации тока были успешно верифицированы с использованием реальных УРЗА, посредством воспроизведения осциллограмм тока, содержащих сигналы с граничными значениями времени до насыщения ТТ, при которых наблюдается первое неправильное поведение проверяемой функции защиты и ее устойчивое правильное поведение (схемы экспериментов на рис. 1).

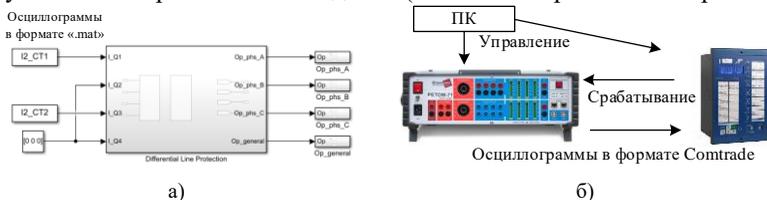


Рисунок 1. Схемы выполненных экспериментов: а) при использовании имитационной модели УРЗА, б) при использовании реального УРЗА

Воспроизведение банка осциллограмм с оценкой поведения реального УРЗА осуществлялось с использованием РЕТОМ-71. Выполненные исследования позволили не только верифицировать значения времени до насыщения ТТ минимально необходимого для корректной работы УРЗА, но и оценить поведение используемых алгоритмов УРЗА в переходных режимах, с целью их последующей модернизации.

Библиографический список

1. **Определение** требуемого времени точной трансформации тока для корректной работы ДЗТ / А. В. Панащатенко, А. А. Яблоков, С. Е. Бобров [и др.] // Технологический суверенитет России в области РЗА и АСУ ТП и устойчивость в условиях санкционных ограничений : Всероссийская НТК по РЗА ЭЭС, Чебоксары, 23–25 апреля 2024 года. – Чебоксары, 2024. – С. 337-340. – EDN HSMFTFG.

*И.А. Галанин, асп.; рук. доц. Т.Ю. Шадрикова
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ОСОБЕННОСТЕЙ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Введение. Вейвлет-преобразование (ВП) – относительно новый математический инструмент в области электроэнергетики (с 1994 г.), получивший широкое распространение практически во всех направлениях развития электроэнергетических систем. Наиболее актуальной для электрических сетей среднего напряжения является задача совершенствования методов локации места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в первую очередь из-за особенностей переходных процессов при ОЗЗ. В существующих алгоритмах традиционно используется преобразование Фурье. Однако оно обладает рядом недостатков, преодолеть которые позволяет ВП.

Цель – анализ особенностей тока нулевой последовательности защищаемого присоединения для совершенствования алгоритмов локации ОЗЗ на объектах электрической сети среднего напряжения, не оборудованных трансформаторами напряжения для получения напряжения нулевой последовательности.

Сравнение и применение методов вейвлет-преобразования. Проведен сравнительный анализ амплитудно-частотных (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) семейств ортогональных материнских вейвлетов Хаара, Добеши, Койфлета и Симлета и сравнение погрешности определения энергии спектра мультисигнального гармонического сигнала. С учетом проведенных исследований в условиях ограниченных вычислительных ресурсов выбран материнский вейвлет Симлета 9 порядка. Проведен анализ энергии спектра переходного процесса при ОЗЗ, полученного с помощью ВП на базе выбранного материнского вейвлета. Выявлена зависимость уровней энергий ВП от расстояния от шин источника питания до места ОЗЗ – чем ближе точка замыкания на землю, тем более высокие частоты преобладают в спектре тока $3i_0$. Абсолютный уровень энергий ВП при внешнем и внутреннем ОЗЗ пропорциональны соотношению суммарного емкостного тока сети за вычетом собственного, к собственному емкостному току присоединения.

Вывод. Выявленные особенности энергии спектра ВП тока нулевой последовательности защищаемого присоединения могут быть использованы при разработке и совершенствовании токовых алгоритмов локации ОЗЗ.

*Д.Г. Григорьев, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКАЯ ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ГАРМОНИК

Одним из наиболее распространённых в микропроцессорной релейной защите способов вычисления значения основной гармоники в сигнале тока и напряжения от соответствующих измерительных трансформаторов является преобразование Фурье. Данное преобразование позволяет получить амплитудо- и фазочастотное представление сигнала из выборки мгновенных значений во временной области. Полученный результат представляет собой вектора гармоник с частотами, кратными обратной величине от времени взятия выборки. Стандартным значением времени является несколько периодов основной частоты сети.

Преобразование Фурье является удобным инструментом при вычислении значений гармоник в сети. Однако для простых защит, вроде токовой отсечки, все значения, кроме значения амплитуды основной гармоники сети, являются избыточными.

Для вычисления значения первой гармоники разными коллективами авторов были разработаны алгоритмы, опирающиеся на измерение нескольких соседних мгновенных выборок сигнала, как например в [1]. Самым быстрым методом является получение вектора по одной выборке, описанное в [2]. Однако все эти методы используют значение производной тока, в явном или неявном виде, расчётное или измеренное, что приводит к искажению замера при наличии гармоник в сети.

В данной работе приведён способ фильтрации гармоник, применяющий тригонометрические свойства синусоидальных функций, и в частности формулу:

$$\sin(x) + \sin(y) = 2 \cdot \sin\left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{x-y}{2}\right)$$

Применяя простые для вычисления на процессорах операции, можно получать мгновенные значения всех гармоник с точностью, сравнимой с точностью преобразования Фурье, за то же время.

Библиографический список

1. Патент № 2688896 С1 Российская Федерация, МПК G01R 19/00. Способ определения мгновенных значений параметров режима (токов и напряжений) : № 2018106223 : заявл. 19.02.2018 : опубл. 22.05.2019 / Е. В. Лесных, Н. С. Бурянина, Ю. Ф. Королук, К. В. Суслов. – EDN NXGIPG.

2. Лебедев В.Д., Григорьев Д.Г. Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2024. – №. 2. – С. 32-48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048.

*Д.Г. Григорьев, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Аварийные изменения в электрической сети, такие как короткие замыкания, вызывают возникновение аperiodической составляющей в измеренном токе и напряжении. Из-за кратного увеличения тока, классические измерительные трансформаторы тока могут войти в режим насыщения и исказить выходной сигнал, что может привести к несрабатыванию защит.

В отличие от классических трансформаторов, многие современные трансформаторы тока (оптические, катушки Роговского и т. д.) способны измерять протекающий ток практически без искажений даже при большой аperiodической составляющей. В данном случае значение первой гармоники может иметь значительно увеличенное значение, что приведёт к ложному срабатыванию защит в ряде случаев.

Для исключения ложных срабатываний и несрабатываний защит, необходимо применять фильтрацию аperiodической составляющей в измеренном сигнале. Технические реализации данных фильтров в своих работах предлагали различные коллективы авторов, например [1].

Развитие измерительной техники привело к тому, что в современных цифровых трансформаторах тока устанавливается сразу два токовых датчика, что даёт нам возможность получать вектора тока для целей релейной защиты, как в [2]. Воспользовавшись данными с ЦТТ и получив вектор тока по двум датчикам, можно в цифровом виде рассчитать параметры аperiodической составляющей и устранить её.

Для данного вида фильтрации можно воспользоваться одним из четырёх способов: полупериодное суммирование векторов, поиск постоянной времени с помощью катушки Роговского, пересечение двух перпендикуляров у хорд окружности, поиск постоянной времени по двум точкам при известной частоте оцифровки.

Библиографический список

1. **Восстановление** электрического сигнала при коротком замыкании методом четырех выборок / М. Л. Корякина, Н. С. Бурянина, Ю. Ф. Королюк, К. В. Суслов // Электроэнергетика глазами молодежи-2019 : материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. Том 2. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 113-114. – EDN QYTNNG.

2. **Лебедев В.Д., Григорьев Д.Г.** Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2024. – №. 2. – С. 32-48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048.

*К.С. Алёшин, А.А. Сёмушкин, асп.; рук. В.А. Шуин, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК СТАТОРА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В ДВУХ ТОЧКАХ И ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В ОБМОТКЕ РОТОРА

Существующие защиты ротора от замыканий на землю в двух точках не обеспечивают достаточной надежности, чувствительности и быстроты действия, в связи с чем актуален вопрос разработки новых видов защит от данных видов повреждений. Перспективными являются защиты, основанные на контроле высших гармоник ЭДС и токов обмотки статора, т. к. состав и соотношение последних изменяется в связи с искажением магнитного потока в воздушном зазоре машины вследствие шунтирования части обмотки возбуждения при замыканиях на землю в двух точках, а также витковых замыканиях.

Исследование поведения высших гармоник статора при данных видах повреждений проводилось с помощью имитационной модели синхронного генератора, выполненной в среде SIMULINK программного комплекса MATLAB.

Результаты исследования показали, что шунтирование части обмотки ротора турбогенератора приводит к появлению четных гармоник в МДС ротора, а соответственно и в результирующем магнитном потоке машины, что приводит к индуцированию данных гармоник в ЭДС элементарных проводников обмотки статора.

Наличие четных гармоник в результирующих напряжениях обмотки статора определяется укорочением шага и схемой соединения обмотки статора, так, например, для наиболее распространенной симметричной двухслойной обмотки статора с фазной зоной 60 градусов четные гармоники в напряжениях статора будут отсутствовать.

Тем не менее, в генераторах, выполненных с двумя параллельными ветвями статора, будет присутствовать уравнивающий ток промышленной частоты, протекающий между нейтральными параллельными ветвями, что в данном случае позволяет реализовать простую защиту от рассматриваемых видов повреждений.

Библиографический список

1. **Турбогенераторы** / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная и др. – Л.: «Энергия», 1967. – 895 с.

*К.С. Алёшин, А.А. Сёмушкин, асп.; рук. В.А. Шуин, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭДС ВЫСШИХ ГАРМОНИК ОБМОТКИ СТАТОРА ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ В ОБМОТКЕ РОТОРА

Замыкания на землю в двух точках, а также витковые замыкания обмотки возбуждения синхронного генератора представляют большую опасность в связи с шунтированием части обмотки, что приводит к неравномерному магнитному потоку в воздушном зазоре между ротором и статором. Неравномерный поток вызывает механические перенапряжения и вибрацию, которые могут повредить ротор и подшипники, а обмотка ротора повреждается термическим действием тока замыкания.

Возможность разработки эффективной защиты от данных видов повреждений на основе контроля высших гармоник ЭДС статора требует анализа последних, как в рассматриваемых аварийных режимах, так и во всех иных возможных режимах работы машины, при этом должны учитываться конструктивные особенности последней. Имитационное моделирование в среде SIMULINK программного комплекса MATLAB позволяет эффективно решить данную проблему.

Разработана модель синхронного генератора, учитывающая основные конструктивные особенности машины, а именно:

- конструкцию ротора;
- схему соединения обмотки ротора;
- укорочение шага и схему соединения обмотки статора;
- насыщение магнитной цепи.

Модель может производить расчет МДС ротора с учетом шунтирования части его обмотки при замыканиях на землю в двух точках или витковых замыканиях. Также производится расчет МДС реакции статора и магнитного потока в воздушном зазоре машины на каждом шаге моделирования, позволяя отразить состав и соотношение высших гармоник ЭДС обмотки статора генератора, как при рассматриваемых видах повреждений, так и в других режимах.

Библиографический список

1. **Hartmann W.** Advanced Generator Ground Fault Protections in Pulp and Paper Mill Applications // Beckwith Electric Company: Florida, USA, 2016.

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

ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ДЛЯ СЕТЕЙ 6-10 кВ С РАСПОЗНАВАНИЕМ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Максимальные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП) от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) получили наиболее широкое применение в распределительных кабельных и воздушных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью. Основным фактором, ограничивающим селективность и чувствительность традиционных исполнений ТЗНП, является влияние на их функционирование интенсивных переходных процессов при дуговых ОЗЗ. Распознавание разновидностей ОЗЗ (устойчивые, дуговые перемежающиеся, дуговые прерывистые, однократные пробой изоляции) позволяет автоматически изменять уставки срабатывания защиты и алгоритм ее функционирования, обеспечивая повышение селективности и чувствительности. Для решения задачи распознавания указанных разновидностей ОЗЗ может быть использован принцип выполнения релейной защиты, получивший название многопараметрического [1]. Применительно к ТЗНП применение данного принципа означает расширение информационной базы защиты за счет использования в целях распознавания вида повреждения и поврежденного присоединения не только значения тока нулевой последовательности $3i_0$ защищаемого присоединения или его составляющей основной частоты 50 Гц I_{50} , но и дополнительных параметров. К таким дополнительным информационным параметрам относятся, в частности, соотношение суммарного уровня высших гармонических составляющих $I_{ВГ\Sigma}$ и составляющей основной частоты I_{50} в токе $3i_0$ в установившихся и переходных режимах ОЗЗ, а также величина интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции при дуговых замыканиях.

В докладе рассматривается структурно-функциональная схема разработанной многопараметрической ТЗНП и алгоритм ее функционирования.

Библиографический список

1. Голубев А.Н., Добрягина О.А., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. Многопараметрические токовые защиты от замыканий на землю кабельных сетей напряжением 6–10 кВ // Электрические станции, 2017, № 8. – С. 36–45.

Д.И. Кондратьев, ст., А.С. Корычев ст.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАТУШЕК РОГОВСКОГО

С развитием микропроцессорной техники в электроэнергетику все активнее внедряются измерительные трансформаторы переменного тока с немагнитным сердечником, а именно катушки Роговского, так как трансформаторы с металлическим сердечником несовершенны. Катушки Роговского могут использоваться как датчики тока в релейной защите. Однако результаты измерений подвержены влиянию многих факторов: положению провода внутри катушки, внешнему электромагнитному полю, температуре окружающей среды [1].

В рамках данной работы были исследованы зависимости 24 катушек Роговского от положения первичного провода на испытательном стенде (рис.1 а) с помощью разработанного устройства позиционирования (рис.1 б). Полученные зависимости были обработаны методами математической статистики, построены зависимости в программе Excel (рис.2).

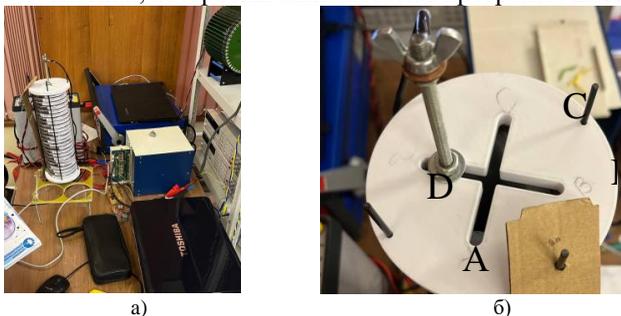


Рисунок 1. Лабораторная испытательная установка с устройством позиционирования провода

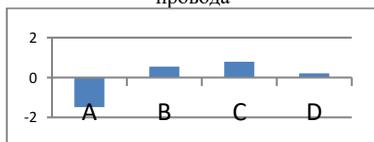


Рисунок 2. Отклонение коэффициента преобразования относительно центра в крайних точках относительно центра в процентах. Усредненная статистика

Библиографический список

1. **Разработка** и исследование катушки Роговского для работы в условиях эксплуатации открытого распределительного устройства / А. А. Яблоков, П. А. Кабаков [и др.] // Вестник ИГЭУ. — 2023. — № 1. — С. 31-40.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ПО ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Электромагнитные трансформаторы тока (ТТ) широко применяются для измерения электрического тока на объектах электроэнергетики. Для математического моделирования ТТ используют классическую схему замещения, в состав которой входят параметры вторичной обмотки. Собственная индуктивность вторичной обмотки L_2 вносит значительный вклад в функционирование измерительного трансформатора в переходных режимах электроэнергетической системы, а также является важным параметром при восстановлении вторичного тока [1]. Значение индуктивности L_2 может быть получено с помощью аналитических методов расчета и способов косвенного измерения. Однако на практике редко существует возможность проведения дополнительных испытаний при проверке ТТ с целью измерений параметров вторичной обмотки. Область применения аналитических методов также значительно ограничена из-за отсутствия информации о геометрических параметрах магнитопровода ТТ в его паспорте.

Для определения значения индуктивности L_2 возможно использовать вольт-амперную характеристику ТТ. При увеличении напряжения на выводах вторичной обмотки ток намагничивания будет определяться преимущественно параметрами вторичной обмотки (индуктивность и активное сопротивление вторичной обмотки – L_2, R_2). Отношение координат крайней правой точки на вольт-амперной характеристике равняется полному сопротивлению вторичной обмотки, за исключением параметров цепи намагничивания, с некоторой погрешностью. Для увеличения точности расчета предлагается использовать наклон вольт-амперной характеристики в области насыщения.

Библиографический список

1. **Вихарев, Д. Ю.** Алгоритм восстановления приведенного первичного тока при насыщении электромагнитного трансформатора тока без использования характеристики намагничивания / Д. Ю. Вихарев, Н. А. Родин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2022. – № 6. – С. 36-45. – DOI 10.31857/S0002331022060061. – EDN AGKYMW.

*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 СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ СЕРИИ «СИРИУС»

Введение. Для предотвращения неправильных действий дистанционной защиты (ДЗ) при качаниях мощности и в асинхронном режиме в устройствах РЗА предусматриваются алгоритмы блокировки. Микропроцессорные устройства РЗА дают возможность реализовать различные алгоритмы блокировки при качаниях (БК). Один из них: алгоритм БК по скорости изменения сопротивления (БКз).

Цель работы. Создание модели алгоритма БКз устройств серии «Сириус» для его дальнейшего исследования.

Метод исследований. Используется метод имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB. Верификация модели проводится с помощью устройства серии «Сириус» с функцией БКз в составе функции ДЗ и устройства РЕТОМ.

Моделирование алгоритма БКз и его верификация. Модель алгоритма и модель сети для его испытаний выполнены в соответствии с данными [1, 2] и информацией АО «РАДИУС Автоматика». Настройка алгоритма выполнена по данным моделируемой сети [2].

Верификация модели проводилась на реальном устройстве серии «Сириус» с функцией БКз в составе функции ДЗ подачей на него осциллограмм различных режимов в формате COMTRADE от устройства РЕТОМ, записанных с помощью модели сети в MATLAB.

Результат работы. Подтверждена адекватность созданной модели алгоритма БКз. Выходные сигналы модели соответствуют выходным сигналам устройства «Сириус» на идентичные входные воздействия.

Выводы. По результатам работы возможны дальнейшие исследования алгоритма БКз и его совершенствование для работы в составе 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».

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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА КАТУШКИ РОГОВСКОГО

Цифровая трансформация электроэнергетической отрасли, развитие микропроцессорных технологий в релейной защите и автоматике (РЗА), наличие недостатков электромагнитных трансформаторов тока (эффекты насыщения и остаточной намагнитченности, большие массогабаритные показатели, сложности монтажа), накопление опыта разработок и эксплуатации нетрадиционных преобразователей тока являются причинами увеличения применения катушек Роговского для целей РЗА.

Конструкция и принцип действия катушки Роговского были впервые описаны в 1912 году немецкими учеными W. Rogowski и W. Steinhaus. Принцип работы катушки Роговского не отличается от электромагнитных трансформаторов тока. Основное различие между данными преобразователями заключается в том, что вторичная обмотка катушки Роговского намотана на неферромагнитный сердечник. Катушка Роговского обладает множеством преимуществ: возможность изготовления разъемной и гибкой конструкции, высокая линейность даже при преобразовании токов короткого замыкания с аperiodическими составляющими, малые габариты и вес, возможность определять быстроменяющиеся токи (вплоть до нескольких наносекунд) и другие. Выходным сигналом данного нетрадиционного преобразователя является напряжение, пропорциональное производной тока. Традиционные алгоритмы РЗА реагируют на мгновенное или действующее значение тока, а не его производной. В связи с этим, актуальным является разработка и исследование методов интегрирования сигнала катушки Роговского в частотной и временной областях.

В ходе выполнения работы была разработана имитационная модель участка электрической сети, а также программа для автоматизированного расчёта различных нормальных и аварийных режимов его работы. Разработано и исследовано более 10 различных методов интегрирования сигнала катушки Роговского. Выявлены дополнительные погрешности, которые могут возникать при интегрировании производной тока короткого замыкания и исследованы способы их устранения.

*Д.А. Долгих, студ.;рук. Д.Ю. Вихарев, ассист., Н.А. Родин, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ТОКЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Короткие замыкания в энергосистемах сопровождаются протеканием больших значений токов, которые могут быть представлены в виде суммы периодической и аperiodической составляющих:

$$i(t) = i_n(t) + i_a(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) + Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

Появление аperiodической составляющей в токе (1) приводит к возникновению погрешностей при определении действующего значения и начальной фазы сигнала.

Исследование направлено на разработку алгоритма, позволяющего определить параметры аperiodической составляющей. Суть алгоритма заключается в интегрировании сигнала за период промышленной частоты, что позволяет избавиться от влияния периодической составляющей. Определив интегралы в текущий и предыдущий моменты времени, рассчитываются начальное значение и постоянная времени затухания аperiodической составляющей. Демонстрация действия разработанного алгоритма представлена на рис. 1.

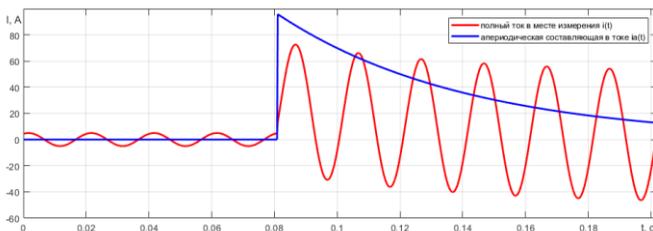


Рисунок 1. Демонстрация действия алгоритма

Вычислительные эксперименты показали высокую точность при определении параметров аperiodической составляющей. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритма фильтрации аperiodической составляющей в целях уменьшения погрешностей при определении параметров периодической составляющей сигнала.

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

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Задача разработки новых методов и алгоритмов дистанционного определения места повреждения (ДОМП) на линиях электропередачи (ЛЭП) высокого и сверхвысокого напряжения остаётся актуальной. Наибольшее распространение получили методы ДОМП, использующие параметры аварийного режима (ПАР) [1].

Развитие централизованных систем контроля, защиты и измерений (в англоязычной литературе - Wide Area Measurements, Protection and Control System) позволяет использовать синхронизированные векторные измерения (СВИ) для повышения эффективности выполнения ряда задач оперативно – диспетчерского управления.

Повышение точности ДОМП по ПАР возможно при применении СВИ совместно с централизованным сбором аварийных осциллограмм от регистраторов аварийных событий (РАС). Основные искажающие замер факторы, влияние которых возможно свести к минимуму, при предлагаемой концепции: неактуальность параметров модели участка электрической сети, метрологическая погрешность измерительного канала, целостность цепей тока и напряжения. Более того, организация данной системы позволит автоматизировать ряд функций, сокращая временные затраты на реализацию ДОМП.

Доклад содержит анализ подходов к ДОМП на ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения. В работе будут рассмотрены особенности организации централизованного ДОМП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01217, <https://rscf.ru/project/23-79-01217>.

Библиографический список

1. **Куликов, Ф. А.** Разработка алгоритма определения места повреждения с уточнением параметров линии электропередачи / Ф. А. Куликов, А. М. Кормилицына, И. Е. Иванов // *Электроэнергетика* Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 14. – EDN IVYIBJ.

*М.Е. Чельшев, студ.; рук. Г.А. Филатова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФУНКЦИИ РЗА, РЕАЛИЗОВАННОЙ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ЦИФРОВОМ БЛОКЕ ЦТТН 6(10) кВ

В электронном блоке цифрового измерительного трансформатора тока и напряжения (ЦТТН) 6(10) кВ реализовано две функции релейной защиты и автоматики (РЗА) – определение места междуфазного короткого замыкания (КЗ) и определение поврежденного участка при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ). На высоковольтной установке было выполнено более 1000 натуральных экспериментов, с учетом ограничений по нагреву элементов установки. Остальные исследования проводились в «оффлайн» режиме, при подаче записанных в csv-формате осциллограмм дуговых перемежающихся замыканий на землю (ДПОЗЗ) и КЗ в разработанную программу PhaseFaultDetectorApp.

Оценивалась правильность работы алгоритмов (селективность определения поврежденного участка при ОЗЗ и ДПОЗЗ, точность определения расстояния при КЗ), а также их работа в условиях влияния искажающих замер факторов, например, больших переходных сопротивлений (порядка 1000 Ом) в месте ОЗЗ и КЗ. Исследование проводилось на моделях сетей 6(10) кВ, реализованных в RSCAD RTDS, содержащие ответвления, несимметричную электрическую нагрузку и другие элементы, полученных в ходе I года выполнения проекта [1].

По результатам исследований, алгоритм определения направления ОЗЗ, реализованный непосредственно в цифровом блоке, показал достаточную чувствительность при внутренних ОЗЗ, включая ДПОЗЗ. При внешних ДПОЗЗ наблюдалось излишнее срабатывание (примерно в 6% случаев).

По результатам исследований, алгоритм определения междуфазного КЗ, реализованный непосредственно в цифровом блоке ЦТТН, обеспечивает чувствительность при переходных сопротивлениях до 1000 Ом и погрешность не более 3%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00084, <https://rscf.ru/project/23-29-00084>.

Библиографический список

1. **G. Filatova, O. Dobryagina and S. Litvinov**, "Development of a 10 kV Grid Model for the Research Methodology of Digital Instrument Transformers in the Conditions of Arc Intermittent Single-Phase Earth Faults," 2023 International Russian Automation Conference (RusAuCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 716-720.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК БРОСКОВ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110-220 кВ

Броски тока намагничивания (БТН) силовых трансформаторов и автотрансформаторов возникают в электрических сетях 0,4–750 кВ при подключении ненагруженного трансформатора (или трансформатора с небольшим уровнем нагрузки) к сети (при оперативных переключениях, при опробовании в цикле автоматического повторного включения и пр.).

Для обеспечения несрабатывания устройств релейной защиты (РЗ) при возникновении БТН предпринимается ряд мер, таких как:

- отстройка от компонентов БТН путем выставления уставок пусковых измерительных органов (ИО) (сопротивления, тока и пр.), при которых БТН будет находиться «за пределами» зоны действия ИО;

- функциональная отстройка от БТН (конструктивные особенности реле РНТ-565 и пр. предполагают автоматическое заглубление реле при появлении БТН исходя из его конструкции);

- программная отстройка от БТН с применением преобразования Фурье и пр.;

- блокировка РЗ при появлении БТН по факту срабатывания дополнительных ИО (ИО по 2-й гармонике тока).

Для дальнейшего исследования степени влияния БТН на функционирование ИО РЗ различного типа целесообразно в первую очередь исследовать количественные характеристики БТН с применением имитационных моделей, чему и посвящена указанная работа. Исследованию подлежит влияние на БТН следующих условий/факторов: сопротивление питающей системы; наличие и величина нагрузки трансформатора; длина питающей ЛЭП; тип включения (однофазное, двухфазное, трехфазное); режим заземления нейтрали трансформатора и пр.

Библиографический список

1. **Засыпкин, А.С.** Релейная защита трансформаторов / А.С. Засыпкин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НЕЙТРАЛИ

Одним из наиболее распространенных типов повреждения в электрических сетях 6-10 кВ различного назначения является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Основная опасность ОЗЗ состоит в существенных перенапряжениях, кратность которых в сети с изолированной нейтралью может достигать $k_n = 1,73$ (при устойчивых ОЗЗ) и $k_n = 2,5-4,0$ (при дуговых перемежающихся ОЗЗ) [1].

В связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос, связанный с исследованием кратности перенапряжений в сетях 6–10 кВ с различными режимами работы нейтрали (изолированная нейтраль; резонансное заземление нейтрали через ДГР, высокоомное заземление нейтрали, комбинированное заземление нейтрали, низкоомное резистивное заземление нейтрали) и выбором наиболее приемлемого с точки зрения кратности перенапряжений и иных ограничивающих факторов (термическая стойкость кабелей и электрооборудования) режима работы нейтрали.

Рассмотрению подлежат устойчивые ОЗЗ, дуговые перемежающиеся и дуговые прерывистые ОЗЗ.

Для решения указанной задачи использовался программный комплекс PSCAD для моделирования стационарных и нестационарных процессов при ОЗЗ.

Библиографический список

1. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. М.:НТФ «Энергопрогресс». //Приложение к журналу, «Энергетик», выпуск 11(35) 2001, 102 с.

*Л. Р. Романов, асп.; Е. С. Подшивалов, асп.; О. В. Крюков, д.т.н.
(ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород)*

ОЦЕНКА ПРИЧИН НЕКОРРЕКТНОЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В Российской электроэнергетике в настоящее время осуществляется модернизация электросетей и их цифровизация в рамках программы ПАО «Россети». Обновляются комплексы релейной защиты и автоматики (РЗА), являющиеся ключевыми элементами надежности электрооборудования. Несмотря на повышенную надежность новых микропроцессорных систем РЗА, требуется их корректная интеграция и синхронизация с действующим оборудованием. Это критически важно для эффективного устранения аварий и предотвращения ошибочных срабатываний.

В докладе проанализированы обновленные данные из отчета АО «СО ЕЭС» о результатах неправильного функционирования устройств РЗА в ЕЭС России за с 2019 по третий квартал 2024 год [1] и обозначены перспективные способы снижения количества случаев некорректной работы. Наиболее распространенными причинами неисправностей в системах РЗА все также остаются дефекты во вторичных цепях и самом оборудовании и их физический износ (26–28%). Если же говорить об организационных причинах неправильной работы РЗА, то лидирующими причинами являются непринятие необходимых мер по продлению срока службы или замены аппаратуры РЗА и их вспомогательных элементов (20%) и недостатки по техническому обслуживанию (ТО) устройств РЗА (10%). Стоит также отметить, что довольно большой процент случаев остается без определения причины (13%) и в 2024 году он увеличился относительно прошлых лет.

Результаты оценки причин неисправностей показывают, что для устойчивой работы систем РЗА необходимо своевременно заменять технически и морально устаревшее оборудование, проводить регулярные проверки действующих устройств, соблюдать графики планового ТО. Для снижения доли невыявленных причин отказов требуется развивать системы мониторинга, внедряя новые решения и модернизируя существующие.

Библиографический список

1. **Информация** о результатах функционирования устройств РЗА в ЕЭС России в 2024 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-base/rza/rza-account-analys/rza-results-info/2024/> (дата обращения 10.02.2025).

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

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

Насыщение традиционных электромагнитных трансформаторов тока вызывает неправильные действия РЗА, недоучёт электроэнергии [1, 2].

В цифровых трансформаторах тока и напряжения (ЦТТН) за счёт использования в конструкции первичных преобразователей тока (ППТ), выполненных с применением аморфной стали, проявление описанных недостатков может быть снижено или исключено.

В работе проведено исследование с помощью испытательных комплексов РЕТОМ–25 и СТ Analyzer кривых намагничивания магнитопроводов из аморфной стали для ППТ ЦТТН. Проанализированы решения, направленные на снижение влияния эффектов насыщения, в том числе с применением разрезных магнитопроводов (образец 4 на рис. 1).

По полученным данным выведено выражение для аппроксимации кривой намагничивания разрезного магнитопровода с погрешностью не более 5% на линейном участке и участке насыщения. Так же по полученным данным в ПК «МАТЛАВ» была создана и проверена в различных режимах работы математическая модель разрезного магнитопровода. Результаты работы приведены на рис. 1.

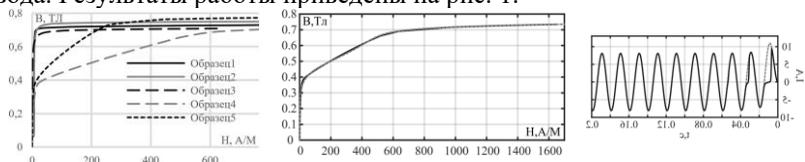


Рисунок 1. Результаты работы

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. **Кужиков С.Л., Нудельман Г.С.** Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №4. С.12–18.

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

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ВЫСОКИХ ЗНАЧЕНИЯХ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА КЗ

Эффективность применения цифрового трансформатора доказана во многих работах [1,2,3]. Главной особенностью цифрового трансформатора является организация измерения протекаемого тока при помощи нескольких датчиков тока, отличающихся различным физическим принципом работы: традиционный электромагнитный трансформатор, катушка Роговского, магнитотранзисторный датчик.

Основные преимущества данных датчиков состоят в более точном измерении тока как в установившихся, так и в переходных режимах. Были произведены исследования работы цифровых трансформаторов в условиях дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю [2], разработаны алгоритмы, позволяющие с более высокой точностью производить замеры [3].

Наряду с этим возникает потребность в оценке функционирования цифрового трансформатора в переходных режимах, сопровождающихся аперриодической составляющей различной длительности.

В рамках исследования в целях оценки работы трансформаторов тока рассматриваются режимы, характеризующиеся наличием аперриодической составляющей в измеряемом токе:

- одностороннее включение линии с шунтирующим реактором под напряжение с последующим отключением;
- короткое замыкание на компенсированной линии;
- однофазное отключение и включение линии на КЗ.

Библиографический список

1. Теория и практика применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Д.Г. Григорьев и др. // Релейщик. – 2023. – № 1(45). – С. 42–49. – EDN TLKQBG.

2. Петров А.Е. Исследование цифровых измерительных трансформаторов в условиях дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю с применением программно-аппаратного комплекс RTDS / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова, А.Е. Петров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024 Т. 24. Номер 2. С. 5-17.

3. Лебедев В.Д. Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В. Д. Лебедев, Д. Г. Григорьев : ил. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. Вып. 2. С. 32-48. ISSN 2072-2672.

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

ОБЗОР СПОСОБОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ ЦИФРОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Применение цифровых технологий имеет большую тенденцию в последнее время и поддерживается различными программами инновационного развития. Активно внедряются цифровые подстанции [1].

На цифровых подстанциях могут применяться традиционные электромагнитные измерители в связке с преобразователем аналоговых сигналов. Недостатки, заложенные в их физических процессах, конструктивных особенностях и принципе действия, обусловленные нелинейностью вследствие насыщения магнитной системы и остаточной намагниченности, приводят вследствие искажения формы тока к неправильной работе устройств релейной защиты и автоматики, что может явиться причиной крупных аварий [2].

Применение цифровых трансформаторов тока и напряжения позволяет повысить точность алгоритмов релейной защиты и учета электроэнергии. Успешность внедрения цифровых трансформаторов в опытную эксплуатацию в ряде электроэнергетических объектов подтверждает целесообразность их применения.

В процессе разработки цифровых трансформаторов встает вопрос осуществления питания электронных частей (блоков). Существуют разные способы организации питания электронных блоков [3], каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Вопросы, решаемые в данном исследовании, заключаются в анализе и определении перспективных направлений в исследовании эффективности питания электронных блоков.

Библиографический список

1. Концепция «Цифровая трансформация 2030» (URL https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjxs5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf)

2. Теория и практика применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения / В.Д. Лебедев, Н.В. Кузьмина, Д.Г. Григорьев и др. // Релейщик. – 2023. – № 1(45). – С. 42–49. – EDN TLKQVB.

3. Нечаев Е.В. Разработка и изготовление электронного блока питания для цифровых электроэнергетических устройств / Е.В. Нечаев, А.А. Яблоков; научный руководитель В.Д. Лебедев // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. Издательский дом МЭИ. Москва. 2017. Т. 3. С. 430.

*А.Е. Петров, асп., рук., В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.,
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИМПЕДАНСА ИСТОЧНИКА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Работа посвящена разработке метода определения комплексного сопротивления источника в последовательной электрической цепи, содержащей источник питания и электродвигатель. В основе метода лежит обработка данных измерений тока и напряжения в процессе пуска двигателя с использованием формата COMTRADE. Предлагаемый подход позволяет вычислять активную и реактивную составляющие импеданса источника на основе известных параметров электродвигателя и анализа переходных процессов. Метод особенно актуален в ситуациях, когда отсутствуют полные данные о параметрах первичной сети, что затрудняет традиционные расчеты.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения надежности энергосистем и точности моделирования динамических режимов работы электрических приводов. Определение параметров источника играет важную роль в диагностике состояния оборудования, прогнозировании аварийных режимов и оптимизации работы системы электроснабжения [1]. В условиях недостатка исходных данных о параметрах сети предложенный метод позволяет восполнить этот пробел за счет анализа реальных измерений. Кроме того, метод может быть интегрирован в системы мониторинга цифровых подстанций, что соответствует современным тенденциям развития интеллектуальных энергосетей (Smart Grid).

Научная новизна исследования заключается в разработке алгоритма вычисления комплексного сопротивления источника по данным временных зависимостей тока и напряжения в переходном процессе. Использование численных методов обработки данных, в том числе регрессионного анализа и цифровой фильтрации сигналов, позволяет повысить точность расчетов [2]. Результаты могут быть применены для совершенствования систем управления электроприводами, диагностики оборудования и моделирования энергосистем.

Библиографический список

1. **Шунн В.А., Фролова О.В.** Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.
2. **Haykin Simon** Adaptive Filter Theory. — Pearson, 2013.

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

СОЗДАНИЕ И АНАЛИЗ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ СХЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД БЛОКА № 3 КАЛИНИНСКОЙ АЭС ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЦЕЛЯХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Обеспечение надежной работы атомной электрической станции (АЭС) во многом определяется надёжностью и устойчивостью функционирования электрической части станции и, в том числе, устройств автоматического управления. Эффективность функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) определяется как уровнем эксплуатации, так и корректностью проектирования этих устройств. При этом задачи анализа функционирования существующих устройств РЗА и вновь устанавливаемых (при модернизации) на электротехнических объектах АЭС, таких как генераторы, трансформаторы, кабельные линии, электрические двигатели, шины и т. п., особенно в электрической части собственных нужд станции, при возникновении различного рода повреждений и аномальных режимов являются актуальными.

Объектом исследования в настоящей работе являются электрическая схема и электротехническое оборудование собственных нужд блока № 3 Калининской АЭС.

Целью работы является разработка и анализ расчетной модели схемы собственных нужд блока № 3 Калининской АЭС для расчетов токов короткого замыкания, используемых при выборе параметров срабатывания устройств РЗА.

Объектом разработки является имитационная модель, разработанная в облачном сервисе «Лаборатория РЗА», электрической схемы, содержащая электротехническое оборудование собственных нужд блока № 3 Калининской АЭС.

Область применения результатов работы – выбор оборудования электрической схемы и проектирование устройств РЗА генераторов, трансформаторов, кабельных линий, электрических двигателей, шин собственных нужд блока № 3 Калининской АЭС.

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.

*А.Д. Серов; рук. Р.В. Бударрагин, д.т.н., доц.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород)*

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА БАЛАНСИРОВКИ МОЩНОСТИ В СИЛОВЫХ ЦЕПЯХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Автоматизация балансировки мощности в силовых цепях автономных источников электроснабжения является актуальной задачей, связанной с обеспечением надежности и безопасности их эксплуатации. Оптимизация процесса балансировки мощности позволяет стабилизировать работу системы и предотвращать нежелательные явления, такие как неконтролируемые отключения или резкие изменения нагрузки. Целью данного исследования является разработка и экспериментальная проверка системы балансировки мощности, способной оперативно реагировать на изменения нагрузки и минимизировать время регулирования.

Основным объектом испытаний является система балансировки мощности, включающая щит балансировки нагрузки (ЩБН) с 11 секциями резистивных элементов, суммарной мощностью 50 кВт, и щит коммутации активной нагрузки (ЩКА) с системой измерения и управления (СИУ), также рассчитанной на 50 кВт. Оборудование изготовлено ООО «НПП «ЮНИОН».

Испытания проводились с использованием имитатора полезной нагрузки, обеспечивающего поочередное кратковременное включение и отключение секций резистивных элементов ЩБН. СИУ, фиксировались переходные процессы при срабатывании коммутационной аппаратуры. Анализ осциллограмм показал, что время включения секции ЩБН составляет 0,69 мкс, а время отключения — 0,056 мкс. (рис.1.)

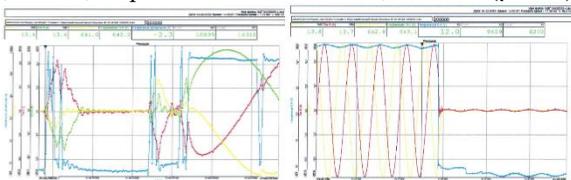


Рисунок 1. Осциллограмма включения и отключения секции ЩБН

По результатам испытаний видно, что система является быстродействующей, что дает возможность её применения в сложных автоматизированных системах балансировки мощности с ограниченным временем реагирования.

*А.А. Потапов, студ.; А.В. Панащенко асп.;
рук. А.А. Яблоков к.т.н., доц., (ИГЭУ) г. Иваново*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РЗА

В современных микропроцессорных устройствах релейной защиты и автоматики (УРЗА) применяются различные способы цифровой обработки сигналов (ЦОС), поступающих на входы устройства. Подавляющее большинство алгоритмов функционирования УРЗА основано на использовании векторных значений тока и напряжения. Вычисление векторов осуществляется при помощи различных математических операций, основанных на преобразовании Фурье, вейвлет преобразовании и др. [1]. Быстрое изменение контролируемых параметров в переходных режимах короткого замыкания (КЗ) неизменно вызывает задержки получения установившегося значения и погрешности его расчета по причине инерционности фильтров, колебательности и перерегулирования, что в свою очередь может привести к неправильным действиям УРЗА – задержке при отключении внутренних КЗ или излишнему срабатыванию при внешних КЗ. Алгоритмы УРЗА, ориентированные на применение мгновенных значений действующих сигналов, также нуждаются в использовании специальных механизмов ЦОС, повышающих стабильность функционирования таких органов в условиях малого времени принятия решения.

Учитывая вышесказанное, актуальным является вопрос поиска способов ЦОС, повышающих быстродействие и надежность работы УРЗА. Дополнительно, увеличивающееся количество случаев применения нетрадиционных преобразователей тока – катушек Роговского, обуславливает необходимость разработки алгоритмов, обрабатывающих значения производной тока.

В работе исследованы динамические характеристики различных способов расчета векторов, обосновано применение тех или иных способов в зависимости от назначения УРЗА и типа первичного датчика тока. Рассмотрены возможности применения катушек Роговского и способы обработки их вторичного сигнала.

Библиографический список

1. **Акиннин, А. А.** Совершенствование технических средств и принципов выполнения устройств противоаварийной автоматики электрических сетей сверхвысокого напряжения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Иваново, 2006. – 186 с. – EDN NNXECT.

*Д.С. Шарыгин, асп.; рук. Г.А. Филатова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЗОНА ОБХОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 кВ И ВЫШЕ

Зона обхода (осмотра) линии электропередачи (ЛЭП) является фундаментальным и основополагающим понятием определения места повреждения (ОМП). Для решения задачи дистанционного ОМП не столько важно получить точный замер о предполагаемом месте повреждения, сколько сформировать обоснованную минимально возможную зону обхода. Обоснование и формирование минимально возможной зоны обхода даёт возможность с большей долей вероятности отыскать место повреждения в соответствии с доверительным интервалом, что позволяет сократить зону обхода, уменьшить затраты и время на локализацию аварии.

Для проведения исследования по формированию обоснованной зоны обхода использовались разработанные алгоритмы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) на мгновенных значениях на модели одиночной ЛЭП с двухсторонним питанием. Построение кривой распределения по функции Гаусса является обоснованной минимальной зоной обхода, для рассматриваемого состава исследуемых факторов с достоверностью нахождения места повреждения 95,45 % в пределах двух стандартных отклонений 2σ .

Расчетные зоны обхода, полученные по методам ОМП по ПАР на мгновенных значениях при использовании неактуализированных удельных параметров ЛЭП, не хуже допустимых значений ширины зоны обхода действующих стандартов эксплуатирующих организаций. Использование уточненных (актуализированных) параметров ЛЭП приводит к значительному повышению точности и сокращению зоны обхода до 0,4 % от длины ЛЭП. Переходное сопротивление, изменение взаимного угла между векторами ЭДС эквивалентных систем, изменение удельного индуктивного сопротивления по ПП и НП являются факторами, которые наибольшим образом оказывают влияние на точность ОМП и формирование минимально возможной обоснованной зоны обхода.

СЕКЦИЯ 15

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

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

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

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

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО СКВОЗНОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

В настоящее время одним из основных направлений использования индукционных установок является сквозной нагрев, применяемый для тепловой обработки металлических заготовок перед их пластическим деформированием. Несмотря на широкий спектр преимуществ использования индукционных нагревателей для указанных целей, многообразие форм, размеров и материалов деталей требует в каждом конкретном случае корректного выбора конфигурации индуктора и мощности установки для обеспечения быстрого и равномерного нагрева при минимальном температурном перепаде в объёме заготовки. С этой целью перспективно использование методов численного моделирования на базе стандартных прикладных программ, позволяющих реализовывать совместное исследование различных физических процессов при учёте особенностей геометрии моделируемых объектов.

При разработке модели для исследования сквозного нагрева цилиндрических стальных заготовок многovitковым внешним индуктором возможно использование двумерной геометрии, которая строится в цилиндрической системе координат. В основе модели лежит совместное использование двух модулей – теплового и электромагнитного, что позволяет проводить корректный учёт характерных свойств модели. Так, для расчёта температуры в объёме заготовки необходимо пространственное распределение тепловыделения, которое может быть получено посредством решения уравнения электромагнитного поля при заданных значениях частоты и величины напряжения на индукторе, а также магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости материалов индуктора и заготовки. Указанные физические свойства материала заготовки существенно изменяются с ростом температуры, что необходимо учитывать в модели вводом соответствующих функциональных зависимостей. Также важным является корректный учёт нелинейных температурных зависимостей теплопроводности, теплоёмкости и плотности материала заготовки, лежащих в основе уравнения теплового модуля.

Разработанная модель позволяет проводить исследования, направленные на оптимизацию процесса индукционного сквозного нагрева заготовок заданного вида, посредством выбора конструкции и размеров индуктора, а также мощности индукционной установки.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В настоящее время электроконтактный нагрев длинномерных заготовок (прутки, проволока, трубы) применяют в условиях массового производства для различных операций последующей горячей обработки металлов давлением (закалка, отпуск, отжиг). В основе процесса лежит пропускание тока через заготовку вследствие чего в ней выделяется тепловая энергия, определяемая законом Джоуля-Ленца. При использовании значительных по величине токов обеспечивается быстрый и равномерный нагрев заготовки и, как следствие, высокая производительность технологического процесса.

Исследование процесса электроконтактного нагрева на постоянном токе может быть выполнено непосредственным решением уравнения энергетического баланса, позволяющим определять объёмную плотность мощности, необходимую для нагрева заготовки до требуемой температуры за заданное время. Однако, несмотря на кажущуюся простоту такого подхода, он обладает рядом недостатков, связанных со сложностью учёта температурных зависимостей физических свойств материала заготовки и влияния тепловых потерь конвекцией и излучением с её поверхности. Это обуславливает перспективность использования методов численного моделирования на базе стандартных прикладных программ.

При разработке численной модели процесса электроконтактного нагрева на постоянном токе электромагнитные процессы в установке рассчитываются через скалярный электрический потенциал, а тепловые процессы в заготовке – посредством решения нестационарного уравнения теплопроводности. При этом исходными данными модели являются потенциалы на боковых стенках заготовки, а также физические свойства материала (удельная электрическая проводимость, теплопроводность, теплоёмкость и плотность), температурная зависимость которых учитывается вводом соответствующих функциональных зависимостей на основе справочных данных. Теплоотдача с поверхности заготовки учитывается настройкой граничных условий, требующей ввода коэффициента теплоотдачи конвекцией и степени черноты. Разработанная таким образом модель позволяет проводить исследования электроконтактного нагрева заготовки заданного вида при корректном учёте характерных свойств модели.

*Е. Н. Баженов, студ.; рук. В. С. Баженов, ст. преподаватель
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ В СВАРОЧНОМ ПОЛУАВТОМАТЕ

В сварочном полуавтомате одним из основных элементов является механизм подачи электродной проволоки. Необходимость управления механизмом подачи сварочной проволоки вызвана тем, что каждому режиму сварки соответствует свой ток, и важно подобрать такую скорость подачи проволоки, чтобы она не успевала «перегорать» и обеспечивала комфортную сварку. Кроме того, необходимо управлять режимами и интенсивностью подачи защитных газов следующим образом: газ должен подаваться до зажигания дуги и после гашения дуги, иначе в начальной и конечной точках шва будет ухудшение свойств металла из-за взаимодействия атмосферного воздуха с горячим металлом.

Реализацию регулировки скорости и подачу защитных газов обеспечивают микроконтроллер и программа по изменению вращения двигателя и поддержанию его на одной и той же скорости вращения, а также программа управления газовым клапаном, открывающая его до начала и после прекращения подачи проволоки. После выставления необходимой скорости контроллер реагирует на нажатие кнопки на ручке управления и подает защитный газ, а спустя заданный промежуток времени запускает привод подачи проволоки.

Для выполнения поставленных задач был разработан микроконтроллер, имеющий модуль АЦП и необходимое количество портов вводов/выводов. В соответствии с разработанным алгоритмом и блок-схемами составлен текст программы в среде MPLAB. Для регулировки скорости вращения двигателя были созданы 4 скоростных режима путем перекодировки АЦП. Для связи микроконтроллера и шагового двигателя была разработана схема сопряжения.

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

УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ 6-10 кВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ФЕРРОРЕЗОНАНСАМ

В распределительных сетях 6-10 кВ на работу измерительных трансформаторов напряжения может оказывать влияние множество опасных явлений, среди которых особенно выделяют феррорезонансы [1, 2]. Для борьбы с такими процессами множество производителей разрабатывают различные варианты исполнения антирезонансных трансформаторов напряжения. Тем не менее, существует проблема экспериментального подтверждения антирезонансных свойств.

В данной статье представлен стенд для проведения натурных испытаний, позволяющий испытывать трансформаторы напряжения 6-10 кВ на устойчивость к феррорезонансам (рис. 1). Представленная в рамках проведенной работы тестовая установка позволяет испытывать трансформаторы напряжения с целью выявления наиболее эффективных мер по предотвращению феррорезонансных явлений.



Рисунок 1. Лабораторная испытательная установка

Библиографический список

1. **Зихерман М.Х.** Трансформаторы напряжения для сетей 6-10 кВ. Причины повреждения // Новости электротехники. – 2003. – №1(25).
2. **Халилов, Ф.Х.** Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений: учебное пособие / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков. СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002. - 272 с.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИНИЦИАЦИЯ СУБГАРМОНИЧЕСКОГО ФЕРРОРЕЗОНАНСА В ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ 6-10 кВ

В нормальном режиме работы сети по первичной обмотке трансформатора напряжения протекают токи порядка нескольких миллиампер. Однако при наличии феррорезонансных процессов в сети эти токи способны достигать величин, превышающих предельные значения по термической стойкости изоляции, что приводит к значительным повреждениям. Согласно [1], в России при дуговых замыканиях на землю и феррорезонансных процессах ежегодно повреждается порядка 6-8% уставовленных трансформаторов напряжения.

В рамках данного исследования субгармонический феррорезонанс в сети был получен с помощью опыта с включением предварительно заряженного конденсатора в нейтраль силового трансформатора. Полученные при проведении опытов осциллограммы напряжений и токов в первичных обмотках испытываемых трансформаторов напряжения для емкости 1,5 мкФ представлены на рис. 1. По итогам испытаний был выявлен факт выхода из строя резисторов, установленных в нейтрали измерительных трансформаторов напряжения.

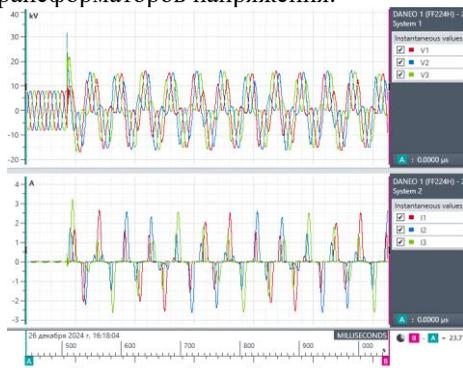


Рисунок 1 Осциллограммы напряжений и токов в первичной обмотке трансформаторов напряжения при подключении в нейтраль силового трансформатора заряженной емкости величиной 1,5 мкФ

Библиографический список

1. Халилов, Ф.Х. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений: учебное пособие / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков. СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002. - 272 с.

*А.Р. Попов, асп.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОБ АКТУАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы являются одним из важных элементов энергосистем. Надежность электрических сетей, электростанций и энергосистем в значительной степени зависит от эксплуатации силового электрооборудования. Отключения при авариях, дефекты и повреждения приводят к убыткам, наносят урон окружающей среде.

Так как современные методы диагностики не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта, исследованию новых методов уделяется большое внимание как в зарубежной, так и в отечественной науке, в частности, искусственному интеллекту.

Разработка системы мониторинга силовых маслонаполненных трансформаторов с использованием технологий искусственного интеллекта, реагирующего на процент содержания углеводородных газов в масле, скорость нарастания этих газов, появление частичных разрядов, содержание влаги в масле и загрязнение масла позволит уменьшить влияние человеческого фактора, уйти от устаревших методик диагностики технического состояния электрооборудования, своевременно принимать решение о необходимости технического обслуживания, ремонте или замене оборудования, правильно расставить приоритеты при обслуживании, а также спрогнозировать работу и избежать сбоев.

Наиболее оптимальным представляется использовать Рекуррентные нейронные сети (*RNN*) для анализа временных рядов с короткими временными зависимостями и сети с долгой кратковременной памятью (*LSTM*) для анализа временных рядов с длительными временными зависимостями и комплексной динамикой.

Библиографический список

1. **Львов М.Ю., Львов Ю.Н.** Мониторинг аварийного режима силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Энергия единой сети, 2019, No 5(48) С. 62-67;
2. **С. В. Кильчанов, М. В. Коротченков, И. А Щербатов.** Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2019. № 4(9). – С. 32–36.

*А.Р. Попов, асп.; рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Исследованию новых методов диагностики уделяется большое внимание как в зарубежной, так и в отечественной науке, поскольку современные методы не всегда однозначно указывают на место и вид дефекта. Одним из популярных направлений является применение искусственного интеллекта для выявления дефектов в силовом электрооборудовании [1].

Как правило, искусственный интеллект используется для задач обнаружения, классификации и локализации повреждений.

В основе успешного создания и функционирования нейросетевой модели для оценки состояния электрооборудования лежит качественно подготовленный и всесторонний набор данных. Важность этого этапа обусловлена необходимостью обучения модели распознаванию широкого спектра условий работы оборудования, включая нормальные рабочие параметры и признаки потенциальных неисправностей.

Данные для обучения и тестирования модели могут быть собраны из различных источников:

- исторические данные;
- данные с датчиков.

В разработке нейросетевой модели для оценки состояния трансформаторного оборудования ключевым этапом является обучение, в ходе которого модель «изучает» закономерности в данных, позволяющие ей делать точные предсказания и выявлять потенциальные неисправности. В зависимости от специфики задачи и характера доступных данных, могут быть применены различные подходы к обучению: обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением. Каждый из этих методов имеет свои особенности и области

К основным недостаткам искусственного интеллекта следует отнести медленное обучение, необходимость большого объема данных для обучения и сравнительно небольшую точность диагностирования параметров.

Библиографический список

1. С. В. Кильчанов, М. В. Коротченков, И. А. Щербатов. Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2019. № 4(9). – С. 32–36;

*Р.К.Зарипов асп.; рук. А.Е. Сидоров, к.т.н, доцент
(КГЭУ, г.Казань)*

ЗАВИСИМОСТЬ УРОВНЯ ЭМИССИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОПРИБОРОВ ОТ УРОВНЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

Одним из основных факторов, влияющих на качество электрической энергии в электросетях (ЭС), является уровень эмиссии высших гармоник (ВГ) потребителями. Среди бытовых приборов наиболее высокий уровень коэффициента нелинейных искажений, достигающих 200%, имеют светодиодные лампы (СДЛ) [1]. На графике представлены зависимости K_i от K_u для СДЛ [2], шунтированных линейными нагрузками (1-8) и ламп накаливания (9-10).

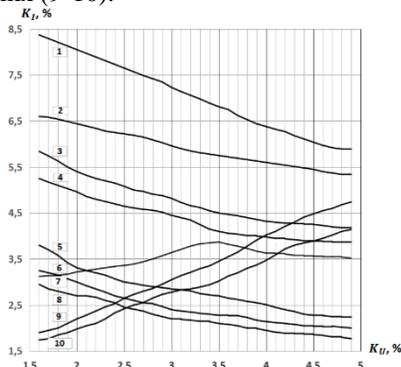


Рисунок 1. График зависимости K_i от K_u для нелинейных (1-8) и линейных (9-10) приборов.

При преобладании в нагрузке линейной составляющей, наблюдается прямая зависимость K_i от K_u , а для нелинейной – обратная, что наглядно демонстрирует кривая (6). Соответственно, для определения истинного уровня эмиссии ВГ электроприборами, предлагается формула:

$$K_{\text{ист.}} = K_i + \gamma K_u$$

где γ – поправочный коэффициент.

Библиографический список

1. Тукшаитов Р.Х., Зарипов Р.К. Об одном эффективном способе снижения уровня эмиссии светодиодными лампами в электросеть высших гармоник ромышленной частоты // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2023. № 1 (76). С. 70-74.
2. Тукшаитов Р.Х., Зарипов Р.К. Метрологическое обеспечение измерения малых значений коэффициента нелинейных искажений электрооборудования на основе физического его моделирования // Практическая силовая электроника 2024. №4(96). С.42-45.

Ю.А. Клуноко; рук. С.А. Чумаков
(ВА РБ, г. Минск)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Система электроснабжения (СЭС) является неотъемлемой частью автономного объекта вооружения (АОВ), без которой его функционирование невозможно. Анализ показывает [1], что при сравнимых значениях мощностей СЭС переменного тока и импульсной (нелинейной) нагрузки неизбежно искажается форма кривой напряжения.

На сегодняшний день существуют технические возможности разработки систем коррекции качества питающего напряжения на основе активных фильтров АФ. Система коррекции качества питающего напряжения должна подключаться параллельно системе «СЭС – АОВ» и включать: измерительную систему, решающую задачу вычисления пассивной составляющей мгновенного тока, систему управления, осуществляющую преобразование полученного тока в сигнал задания тока активного фильтра, систему управления силовой частью, которая преобразует сигнал задания тока активного фильтра в закон переключения вентилях силовой части, силовую часть, которая формирует ток компенсации $i_k(t)$.

Вычисление пассивной составляющей мгновенного тока предлагается проводить по выражениям для амплитуд и начальных фаз гармонических составляющих тока, полученных на основе анализа временных параметров кривой тока [2]. Преимуществом данного метода является высокое быстродействие, основанное на одновременном вычислении амплитуд I_n и начальных фаз ψ_n спектральных составляющих за 1/2 периода повторения тока и отказ от использования полосовых фильтров.

Библиографический список

1. **Требования** к унифицированным модулям питания для систем электроснабжения мобильных объектов [Электронный ресурс] / Научно-производственный центр «Технологическая лаборатория». – РФ, 2015. – Режим доступа: <http://www.techlab.ru/pub>. – Дата доступа: 13.02.2021.

2. **Способ** спектрального анализа квазипериодического электрического сигнала: пат. 19875 Респ. Беларусь, МПК G 01 R 23/16 / Ю. В. Суходолов, Л. П. Крученко, С. А. Чумаков, Н. В. Пушкарева; заявитель Воен. акад. Респ. Беларусь. – № a20130997; заявл. 19.08.2013; опубл. 30.04.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 1 (108). – С. 121-122.

*М.А. Голубев, студ.; рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г. Иваново)*

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОБЩУЮ МЕХАНИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ

В тяговых электромеханических трансмиссиях электротранспорта с использованием мотор-колес, ленточно-транспортных и некоторых других устройствах приводные асинхронные электродвигатели работают параллельно на общую механическую нагрузку. Параллельная работа нескольких электродвигателей повышает надежность установки, при низких механических нагрузках возможно отключение некоторых электродвигателей с экономией электроэнергии. Однако в случае различия двигателей, отличия их параметров механическая нагрузка может распределяться между двигателями неравномерно – одни двигатели нагружаются больше, чем другие. В предельных случаях некоторые двигатели могут переходить в генераторный или даже тормозной режим.

Целесообразна выработка условий эффективной параллельной работы электродвигателей на общую механическую нагрузку, оценка влияния различия номинальных мощностей и параметров электродвигателей на распределение нагрузки. Рассмотрена параллельная работа двух стандартных [1], но отличающихся в два раза по мощности, асинхронных двигателя. В расчетной подсистеме разработки асинхронных двигателей, реализованной в системе Mathcad на основании [2], рассчитаны параметры схем замещения электродвигателей. В подсистеме Matlab Simulink разработана имитационная схема двухдвигательной системы. Полученные результаты распределения механической нагрузки между двигателями далее планируются к сравнению с результатами с взаимосвязанных расчетов полевых моделей этих двигателей в системе Maxwell.

Библиографический список

1. **Асинхронные** двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.
2. **Проектирование** электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с., ил.

СЕКЦИЯ 16

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА:
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**

Председатель – д.т.н., профессор **Савельев В.А.**,

Секретарь – магистрант **Зимичева А.А.**

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

ПРОБЛЕМЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Распределенная генерация (РГ) в настоящее время приобретает всё большую актуальность. Объекты малой генерации позволяют вырабатывать электроэнергию ближе к потребителям, снижая затраты на ее передачу и повышая энергоэффективность. Особую значимость они приобретают в условиях роста электропотребления для удалённых территорий [1].

Выявлены ключевые проблемы интеграции РГ в электрические сети: усложнение диспетчерского управления, увеличение токов короткого замыкания, что требует модернизации оборудования, также влияние на качество электроэнергии и устойчивость, связанная с режимами работы генераторов на мини ТЭЦ.

Установлено, что РГ может работать автономно, полностью обеспечивая потребителей, или параллельно с энергосистемой. Перспективы её развития в России включают рост доли в энергобалансе, внедрение умных сетей и использование возобновляемых источников энергии.

Объекты РГ снижают зависимость электроснабжения потребителей от централизованных систем, снижают потери при передаче электроэнергии по сетям, экологичны и сокращают выбросы в окружающую среду.

Результаты выявленных проблем интеграции РГ в электрические сети энергосистем использованы в выборе объекта исследования.

Направлением дальнейших исследований является моделирование электрических сетей с РГ и поиск решений для минимизации её проблем в системах электроснабжения различных потребителей с использованием результатов в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2035 года [Электронный ресурс]. // Режим доступа: <https://www.npkks.ru/fileadmin/f/documents/energ-strat-2035.pdf>, свободный. – загл. с экрана.

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

ПРОБЛЕМА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Актуальность обеспечения надлежащего качества электроэнергии для всех потребителей в настоящее время имеет большое значение. Низкое качество электроэнергии является одной из причин больших финансовых потерь в энергетике [1].

Выявлено, что снижение качества электроэнергии имеет тенденцию к дальнейшему увеличению. Основная причина этого – изменение характера нагрузки потребителей электроэнергии. Нагрузка все в большей степени становится нелинейной, несимметричной, чувствительной к параметрам напряжения [2]. Это связано с внедрением современного оборудования во всех сферах деятельности человека.

В настоящее время качество электроэнергии нормируются государственным стандартом ГОСТ 32144-2013 [3]. Данный стандарт регулирует такие показатели как отклонение частоты, колебания и несимметрия напряжения, несинусоидальность напряжения и тока, доза фликера.

Проведен анализ современных методов обеспечения надлежащего качества электроэнергии, в результате которого было выявлено несовершенство способов измерения показателей электроэнергии и изношенность основных фондов электроэнергетических предприятий.

В дальнейшем необходимо провести исследования по влиянию показателей качества электроэнергии на системы электроснабжения и использовать полученные результаты в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Наумов А.А.** Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 85- 92.
2. **И.И. Каргашев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, Р.Р. Насыров.** Управление качеством электроэнергии / Учебное пособие - 3-е изд. МЭИ, 2017. - 341с
3. **ГОСТ 32144–2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.

*А. С. Политов, студент рук. О. А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ТРАДИЦИОННЫМИ ПРОВОДАМИ

Основным проблемным вопросом, возникающим при росте потребления электроэнергии в энергосистемах, является:

- создание электропередачи с заданными параметрами и повышенной пропускной способностью [1].

В связи с указанной проблемой, повышение пропускной способности межсистемной ЛЭП 220 кВ в энергосистеме Республики Коми является актуальной задачей.

Цель работы. Сравнительный анализ характеристик традиционных проводов марки АС и проводов нового поколения (АССР) на ЛЭП 220 кВ.

Проведен анализ конструктивных особенностей провода АС и провода АССР, выявлены основные преимущества провода АССР, которыми являются:

- допустимая температура нагрева 210^0 С и значительное увеличение допустимой токовой нагрузки ЛЭП;
- максимально высокая электропроводность;
- максимально высокая механическая прочность;
- устойчивость к старению и ветровым воздействиям.

Проведены расчеты с использованием программного комплекса RastrWin3 и выявлены режимные особенности максимально допустимого перетока (МДП) и аварийно допустимого перетока (АДП) в контролируемом сечении межсистемной ЛЭП 220 кВ по данным РДУ Республики Коми для вариантов с существующей ЛЭП с проводами марки АС и с инновационными проводами АССР.

Полученные результаты отражают техническую эффективность применения проводов нового поколения по сравнению с традиционными проводами и будут использованы в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **СТО 56947007-29060.50.268-2019.** Указания по проектированию воздушных линий электропередачи 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. ПАО «ФСК ЕЭС», 2019.

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ЛИНИЯМИ ТРАДИЦИОННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

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 их режимных характеристик [1].

Цель работы. Анализ характеристик компактных управляемых линий электропередачи (УСВЛ) в сравнении с линиями ЛЭП традиционного исполнения.

По результатам сравнительного анализа характеристик компактных управляемых ВЛ в сочетании с устройствами FACTS и ЛЭП традиционного типа установлено, что использование УСВЛ позволяет: увеличить пропускную способность в 1,2 – 1,6 раза; обеспечить управление потоков мощности в электрически сетях; повысить эффективность использования устройств регулирования реактивной мощности; снизить суммарные потери электроэнергии в энергосистеме; снизить уровень электромагнитных полей [2].

Установлено, что отличительной особенностью УСВЛ является попарное сближение фаз для разных цепей, которое приводит к изменению в большом диапазоне эквивалентных параметров и основных характеристик линии.

Результаты работы будут использованы для решения проблемы повышения пропускной способности конкретной межсистемной ЛЭП при перспективном развитии ОЭС Центра.

Библиографический список

1. **Постолатий В.М.** Компактные управляемые высоковольтные линии электропередачи/ В.М. Постолатий. – Кишенэу, Республика Молдова: Институт энергетикки. – 2019.
2. **Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н.** Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи. Problemele Energeticii Regionale, Chişinău, 2015, №3(29), С. 1-17.

*Д.А. Ушаков, студ.; рук. Серов В.А., к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Стоимость потерь электроэнергии является одной из составляющих тарифа на электроэнергию. Увеличение потерь электроэнергии в электрических сетях – это прямые финансовые убытки электросетевых компаний. Расчеты и обоснование нормативов технологических потерь электроэнергии в электросетевых компаниях, осуществляющих услуги по передаче электроэнергии, выполняются в соответствии с Приказом Министерства энергетики РФ от 30.12.2008 года № 326 [1].

Целью работы является анализ методов расчета потерь электроэнергии в электрических сетях, применяемых в программном комплексе СИМЭС, и их соответствие требованиям [1].

Структуру потерь электроэнергии составляют технологические и коммерческие потери. Технологические потери делятся на технические потери, обусловленные физическими процессами при передаче и распределении электроэнергии, и потери, вызванные допустимой погрешностью приборов учета электроэнергии.

Как показал анализ применяемых в программном комплексе СИМЭС схемно-технических методов расчета потерь электроэнергии, они в значительной степени соответствуют требованиям расчета норматива потерь, определенным в [1]. Поэтому программный комплекс СИМЭС может быть использован для расчета норматива потерь электроэнергии в электрических сетях как замкнутой, так и разомкнутой структуры.

Направлением дальнейших исследований является выбор проблемного участка электрической сети Ивановской энергосистемы и расчет потерь электроэнергии для него. Полученные значения потерь будут проанализированы, в результате чего будут определены проблемные элементы электрической сети и предложены способы уменьшения потерь электроэнергии. Результаты исследований будут использованы в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. **Приказ** Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 года № 326. «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».

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

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Внимание к теме повышения эффективности систем электроснабжения промышленных предприятий вызвано необходимостью энергосбережения, в первую очередь, снижения потерь электроэнергии [1].

Целью работы является комплексный анализ существующей системы электроснабжения конкретного промышленного предприятия и разработка мероприятий по повышению ее эффективности.

Разработана модель существующей системы электроснабжения и проведены расчеты установившихся режимов с применением специализированного программного комплекса EnergyCS Режим.

Предложены основные мероприятия по реконструкции системы электроснабжения: замена устаревших кабелей с бумажной изоляцией на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, применение энергосберегающих трансформаторов и новых комплектных регулируемых конденсаторных установок, предложены способы управления режимом напряжения и реактивной мощностью в схеме электроснабжения.

Выполнен анализ величины потерь электроэнергии в схеме электроснабжения при внедрении предложенных мероприятий по ее реконструкции.

Проведены расчеты по оценке экономической эффективности предложенных мероприятий по энергосбережению.

Полученные результаты работы могут быть использованы при реконструкции существующих систем электроснабжения различных промышленных предприятий и при проектировании новых.

Библиографический список

1. **Энергетическая** стратегия Российской Федерации до 2035 г. Распоряжение правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г № 1523-р.

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

ДИНАМИКА РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Электромобили с недавнего времени стали элементом структуры энергопотребления крупных российских городов. В будущем влияние электромобилей на энергосистему будет расти [1]. Планирование нагрузки систем электроснабжения и планов по ее развитию является важной и актуальной проблемой для энергетиков. Задача применения машинного обучения для прогнозирования рынка электромобилей легла в основу проводимого исследования.

Собранные по публикациям агентства «Деловой профиль» [1] данные отражают значение зарегистрированных классических легковых электромобилей. В предшествующем этапе исследования, опубликованном на конференции «Энергия 2024» [2], отмечены несколько прогнозов, которые использовались в отраслевой экспертизе. После значительных изменений рынка в 2023–2024 годах возникает необходимость пересмотра прогнозов и построение их на основе машинного обучения. Применение обычной модели градиентного бустинга не дало результатов, как и применение подбора гиперпараметров модели. Средняя абсолютная ошибка составила более 1000 ед., а сам прогноз не соответствует имеющимся данным.

Вторая группа моделей ARIMA и SARIMAX применяется именно для прогнозирования нестационарных временных рядов. ARIMA работает с нестационарными рядами без дополнительной обработки. После подбора параметров модель сработала несколько лучше, чем градиентные бустинг (ошибка 800 ед), а SARIMAX же – с ошибкой в 116 ед. Общий прогноз модели – рынок восстановится до пиковых значений осенью 2025 года, и в начале 2026 года достигнет нового пика в 5000 новых машин, далее падение продаж в середине и конце 2026 года до 2000 проданных машин и 3000 соответственно.

Далее планируется использовать альтернативные современные модели NBEATS и DeepAR. Эти модели более эффективны, поскольку не требуют дополнительной подготовки данных, а также лучше работают на малом объеме данных.

Библиографический список

1. **Российский рынок электромобилей: будущее «зеленого» автомобилестроения.** 2021. URL: https://delprof.ru/upload/iblock/233/DelProf_Analitika_Rynok-elektromobiley.pdf (дата обращения: 01.02.2025)
2. **Архив** конференции «Энергия 2024», том 3, стр. 112. 2024.

*Н.Е. Бардюков, студ.; В.А. Савельев, проф.;
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ КАК КЛЮЧЕВОГО СЕКТОРА ТЭК РОССИИ

Топливо-энергетический комплекс является основной базой функционирования, драйвером развития промышленности и одним из наиболее привлекательных направлений для инвестиций. Доля ТЭК в ВВП составляет порядка 20%, объём инвестиций по итогам прошлого года – 10,5 трлн руб. Ключевым сектором ТЭК является электроэнергетика. В отрасли продолжается активное обновление инфраструктуры. В прошлом году введено около 1,7 ГВт генерирующих мощностей.

В числе приоритетных задач – удовлетворение перспективного спроса на электроэнергию, потребление которой будет расти одновременно с опережающим развитием экономики. Для обеспечения дальнейшей надежной работы энергосистемы утверждены Схема и Программа развития электроэнергетических систем России на 2025-2030 гг., а также Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 г. Важным законодательным изменением стал закон о регулировании майнинга цифровой валюты, в соответствии с которым был введен запрет на майнинг в отдельных регионах со сложной режимно-балансовой ситуацией в электроэнергетике.

Наша страна активно вовлечена в международную энергетическую повестку. На протяжении всего 2024 г. Россия председательствовала в БРИКС, уделяя особое внимание укреплению сотрудничества в сфере энергетической безопасности, развитию научно-исследовательской деятельности платформы энергетических исследований стран БРИКС. Благодаря российскому вкладу продвигалась единая позиция альянса по необходимости сбалансированного подхода к развитию отраслей ТЭК.

В 2024 г. была продолжена работа по энергетическому треку в рамках ШОС, «Группы двадцати», АСЕАН, ЭСКАТО ООН, ФГЭС, ОПЕК, IRENA, а также развивалось двустороннее энергетическое сотрудничество. В докладе более подробно рассмотрена роль и место электроэнергетики как ключевого сектора ТЭК в обеспечении энергетической безопасности России.

Библиографический список

1. **Александр Новак:** ТЭК в XXI веке: энергия, достижения журнал Энергетическая политика 2024/15/02.

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

МИРОВЫЕ ЗАПАСЫ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЯ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

По данным British Petroleum на конец 2019 года в пятерку стран-лидеров по запасам каменного и бурого угля входят: США, Россия, Австралия, Китай и Индия [1].

В декабре 2023 года добыча угля в США составила 527, в России – 433, в Австралии – 456, в Китае – 4710, в Индии – 1011 млн тонн [2].

Уголь является более дешевым и надежным энергетическим ресурсом, по сравнению с возобновляемыми источниками энергии, поэтому его использование на ТЭС будет продолжаться. Задача повышения эффективности и экологичности применения угля на ТЭС остается актуальной.

К наиболее перспективным и инновационно-привлекательным технологиям можно отнести: плазменную газификацию угля с воздухом в качестве дутьевого агента и очистку отходящих газов. Последняя не только улучшает экологическую обстановку вокруг ТЭС, но и позволяет получать удобрения «из воздуха», сберегая серу для других производств.

В докладе рассматриваются технологические схемы, экологические показатели применения низкотемпературной плазмы и данные мирового рынка газоочистки до 2030 года в России, США и Китае.

Библиографический список

1. **Statistical** Review of World Energy 2020 [Электронный ресурс]: BP. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (дата обращения: 11.02.2025)
2. **Russia** Coal Production [Электронный ресурс]: CEIC. – URL: <https://www.ceicdata.com/en/indicator/russia/coal-production> (дата обращения: 11.02.2025)

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

СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИРОВОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКЕ

Цель данной работы: оценить потенциал и новые технологии в гидроэнергетике. Определить роль и место гидроаккумулирующих станций в крупных электроэнергетических системах и малых ГЭС в распределенной генерации

Гидроресурсы, освоенные по континентам мира: в Европе и Северной Америке – более 70%, в Азии – около 18%, в Африке – только 8%. В мире наибольшим гидроресурсом обладает Китай 1260 ТВт.ч. В пятерку лидеров входят также Россия, Бразилия, Канада и Индия. Суммарно их гидроресурс составляет около половины мирового потенциала.

Самые мощные ГЭС мира принадлежат таким странам, как: Китай: Санся, Силоду, Сянцзяба, Тунтань; Бразилия. Парагвай: Итайпу, Тикуруи; Венесуэла: Гури; США: Гран Кули; и Россия: Саяно-Шушенская, Красноярская.

ГЭС обеспечивают 20% мировой выработки электроэнергии и используются в 159 странах мира. Общая мощность действующих ГЭС 176 млрд. кВт-ч, выработка 44,426 ГВт. К 2050 году мощность всех ГЭС в мире может вырасти вдвое и достигнуть 2000 ГВт, а выработка превысит 7000 ТВт-ч.

Среди новых технологий, внедряемых сегодня в гидроэнергетику многих стран мира, ведущее место занимают различные конструкции малых ГЭС. Важную роль в энергосистемах играют гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС). В часы малых нагрузок (ночью) гидроагрегаты ГАЭС перекачивают воду из нижнего водоема в верхний, а в дневные часы накопленную воду используют для выработки пиковой энергии. Преимущества ГАЭС состоят в том, что не требуется создание большого водохранилища.

Малые ГЭС относятся к самым перспективным станциям в системе малой генерации. Государство поддерживает строительство ГЭС мощностью от 5 до 25 МВт через механизм конкурсов. В докладе более подробно рассматривается роль и место малых ГЭС в распределенной генерации подпорным сооружениям.

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

МИРОВЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОБЫЧИ, ТРАНСПОРТИРОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ГАЗА

Главной проблемой современной нефтегазовой отрасли является мировой запас нефти и газа. Большинство нефтегазоносных бассейнов суши изучено достаточно полно, поэтому в их пределах возможно открытие преимущественно средних и мелких по запасам месторождений.

Поэтому актуальность приобретает поиск крупных и уникальных месторождений в ранее недоступных районах и в недостаточно изученных породах, залегающих на глубинах 5-7 км и более.

Также важно совершенствовать технологии переработки нефти и газа. В настоящее время научно-техническая база позволяет получать жидкие и газообразные углеводороды из новых типов сырья: битумов, горючих сланцев, угля, метана угольных пластов, газогидратов, пород-коллекторов с низкой проницаемостью.

Транспортировка нефти и газа является неотъемлемой частью нефтегазовой отрасли. Аварии при транспортировке нефти и газа наносят непоправимый ущерб окружающей среде, поэтому большее внимание уделяется повышению надежности танкеров и мониторингу трубопроводных сетей. Для улучшения качества труб применяются новые технологии и материалы, в том числе стеклопластик.

Использование нефти в химической промышленности (масла, битумы, сжиженные газы и другие) составляет лишь около 10%, основная часть нефти перерабатывается в топливо. К концу XXI века глубокой химической переработке для получения ценнейших продуктов будут подвергаться 40-60% нефти и газа. Это следует учитывать при технико-экономическом обосновании строительства традиционной энергетики на базе углеводородов.

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

МИРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА, ТРАНСПОРТИРОВКИ, ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ) НА ТЭС

Сжиженный природный газ (СПГ) представляет собой обычный природный газ, приведенный в жидкие состояния методом охлаждения до -160 °С. Он не токсичен, кипит при температуре $-158...-163$ °С, состоит на 95 % из метана, в остальные 5% входят этан, пропан, бутан и азот.

Крупнейшими производителями СПГ в мире являются Катар, США, Австралия, Россия и Малайзия. На их долю в 2021 году приходилось более половины мирового предложения [1]. СПГ получают путем сжатия и охлаждения природного газа. При этом газ уменьшается в объеме почти в 600 раз. Процесс этот сложный, многоступенчатый и очень энергозатратный – расходы на сжижение могут составлять до 25% энергии, содержащейся в конечном продукте.

Хранение СПГ осуществляется в специализированных ёмкостях, которые бывают трёх видов: наземные, подземные и плавучие.

СПГ используется в энергетике, на транспорте, в промышленности и в быту.

Транспортировка СПГ осуществляется железнодорожным транспортом в цистернах, автотранспортом в автоцистернах или в криогенных танк-контейнерах [1].

Регазификация СПГ – процесс преобразования СПГ из жидкого состояния в газообразное. После этого газ становится пригодным для обычного использования – подачи по трубопроводам потребителям и заправки в газовые баллоны. Установки СПГ могут строиться на магистральных газопроводах и при мощных ТЭС.

В докладе рассматривается технология получения и конкурентоспособность использования СПГ на ТЭС качестве резервного вида топлива.

Библиографический список

1. <https://rgk-palur.ru/SPG-szhizhennyj-prirodnyj-gaz-i-zapornaya-armatura/>
2. **Экология, энергетика, энергосбережение** : бюллетень / под редакцией академика РАН А.В. Клименко. – Москва : ПАО «Мосэнерго», 2023. – 41 с.

СЕКЦИЯ 17

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

Председатель – к.т.н., доцент Сулыненков И.Н.

Секретарь – ст. преподаватель Ушакова Н.В.

*Е.А. Рождественская, студ.;
рук. А.С. Страхов, к.т.н., Д.А. Полкошиников, ст. преподаватель.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЫЯВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА АСИНХРОННЫХ МАШИН В РЕЖИМЕ ВЫБЕГА С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Динамический эксцентриситет (ДЭ) асинхронного электродвигателя (АД) является распространенным дефектом, который при развитии может привести к выходу АД из строя. АД является важной составляющей системы собственных нужд электрической станции, и его отказ может привести не только к значительным финансовым затратам, но и к нарушению технологического процесса. Поэтому обнаружение ДЭ до достижения им недопустимых значений является актуальной задачей.

Целью данной статьи является выявление признаков наличия ДЭ на основе результатов анализа спектров сигналов внешнего и внутреннего магнитных полей в режиме выбега при различной величине ДЭ. Преимуществом контроля состояния АД в режиме выбега является отсутствие на получаемых сигналах помех, наводимых от сети, что приводит к получению более достоверных результатов.

Исследования произведены на компьютерных моделях АД типа ДАМСО-15-12-8 и ДАЗО2-17-44-8/10, разработанных в программном комплексе Ansys с учетом остаточной намагниченности стали. Обработка сигналов в программном комплексе Matlab произведена на основе оконного преобразования Фурье с использованием оконной функции Флэттоп. При этом рассматривались два момента времени: 1 с от начала выбега, когда ток в обмотке ротора еще протекает, и 9 с от начала выбега, когда ток в роторе уже затухает.

В ходе исследования спектров было выявлено, что по мере увеличения степени ДЭ возрастают амплитуды гармоник с частотами, определяемыми выражением $f_{ГДЭ} = f_{осн} \cdot \frac{(p \pm v)}{p}$, где $f_{осн}$ – частота основной гармоники, равная 50 Гц; p – число пар полюсов АД; v – порядок гармоники. При этом из-за остаточной намагниченности рост наблюдается не только в начале выбега при наличии токов в роторе, но и после их затухания, хотя амплитуды гармоник при этом снижаются.

Таким образом, результаты расчетов подтверждают возможность выявления ДЭ в режиме выбега асинхронных электродвигателей.

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

ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА СПЕКТРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Одним из малоизученных дефектов асинхронного электродвигателя (АД) является статический эксцентриситет (СЭ), который может привести к отказу. Отказ АД может привести к нарушению технологического процесса, к его ремонту или полной замене. Целью данной статьи является анализ влияния СЭ на сигналы тока статора (ТС) и индукции внешнего магнитного поля (ВМП) при различной нагрузке.

Исследования проводились на компьютерной модели, разработанной в программном комплексе Ansys. За основу модели был взят АД типа 4А132S4 мощностью 7500 Вт с двумя парами полюсов. Величина смещения ротора при СЭ была принята равной 10% и 30% от величины воздушного зазора. Были рассмотрены три режима работы АД: холостой ход (ХХ), половина номинальной нагрузки и номинальная нагрузка. В программном комплексе MatLab произведена обработка зарегистрированных сигналов с помощью метода быстрого преобразования Фурье, в результате которого были получены амплитудные спектры сигналов, с использованием оконной функции Флэттоп для более точного определения амплитуд гармонических составляющих.

Изучение спектров ТС показало, что при наличии СЭ в режиме ХХ возрастают амплитуды гармонических составляющих с частотой 100 Гц и кратными ей, а также амплитуды зубцовых гармоник и амплитуды гармоник с частотами, близкими к $f = (50 * k \pm 25)$ Гц, где k – целое число. При половине номинальной нагрузки и номинальной нагрузке возрастают в основном амплитуды гармоник с частотами, близкими к $f = (50 * k \pm 25)$ Гц. Изучение спектров индукции ВМП показало, что при наличии СЭ в режиме ХХ и при половине номинальной нагрузки возрастают амплитуды гармонических составляющих с частотами, близкими к $f = (50 * k \pm 25)$ Гц. При номинальной нагрузке характерно появление гармоник с частотами, близкими к $f = (50 * k \pm 25)$ Гц. Во всех рассмотренных случаях при наличии СЭ амплитуды указанных гармоник возрастали как минимум в несколько раз, а для отдельных гармоник – в десятки раз.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было показано, что выявление СЭ АД на основе анализа спектров сигналов возможно и по ТС, и по ВМП при любой его нагрузке.

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

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОВЫШЕННОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА ТОКА СТАТОРА

Известно, что значительная часть оборудования на объектах электроэнергетики является устаревшей или даже выработавшей свой срок службы, поэтому важным аспектом является обеспечение надежности и безопасности их работы, что требует своевременного выявления возможных дефектов и неисправностей. В этом контексте особую актуальность приобретает применение современных методов диагностики, позволяющих оперативно и точно определить состояние оборудования.

В современном мире широкое применение находят синхронные турбогенераторы, используемые в энергетической промышленности. Одним из дефектов, характерных для турбогенераторов, является эксцентриситет. Например, как указано в [1], более чем в 10% случаев незначительные дефекты приводят к появлению повышенной вибрации, и, следовательно, повышенного эксцентриситета. В свою очередь эксцентриситет может привести к серьезному повреждению турбогенератора и необходимости внеплановой остановки блока электростанции.

В ходе литературного обзора было установлено, что одним из наиболее перспективных и малоизученных методов выявления повреждений электрической (например, межвитковых замыканий) и механической (например, повреждений подшипников или эксцентриситета) природы является спектральный анализ сигналов, в частности, сигнала тока статора. Поэтому в ходе анализа было принято решение использовать данный метод для проведения дальнейших исследований.

В ходе дальнейшей работы планируется разработать имитационную модель турбогенератора в программном комплексе Ansys, обнаружить диагностические признаки эксцентриситета в спектрах тока статора на имитационной модели, а также проанализировать спектры тока статора реальных турбогенераторов на атомной электрической станции.

Библиографический список

1. **Самородов Ю.Н.** Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов // Энергия единой сети. – 2014. – №2. – с. 70-80.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные двигатели являются одним из наиболее распространенных типов электродвигателей. Они обладают рядом преимуществ, таких как простота конструкции, надежность и экономичность, но существует сложность диагностики неисправностей и контроля состояния.

Одним из методов обработки диагностических сигналов является преобразование Гильберта, которое позволяет выделить из сигнала его действительную и мнимую составляющую, которые несут информацию о фазовых и амплитудных искажениях, связанных с наличием неисправностей в двигателе. Однако достоверность получаемых результатов получается достаточно низкой. Другим перспективным методом является метод спектрального анализа, основанный на разложении сигналов на частотные компоненты, но чувствительный к эффекту растекания спектра.

Целью исследования является изучение возможности применения комплекса методов преобразования Гильберта и спектрального анализа для контроля состояния асинхронных двигателей.

Исследования проводились на компьютерных моделях, разработанных в программном комплексе Ansys. За основу моделей были взяты электродвигатели марки АИР71А6 и 4А132S4. Были рассмотрены несколько состояний электродвигателей: исправное, обрыв стержня, обрыв 5 стержней, холостой ход со смещением ротора при эксцентриситете величиной 10% и 40% от воздушного зазора. Обработка сигналов осуществлялась в программном комплексе Matlab. В результате проведен анализ экспериментальных данных, полученных на компьютерных моделях.

Было показано, что применение преобразования Гильберта позволяет исключить влияние на результаты контроля основной гармоники сигнала, которая значительно усложняет процесс обработки методом спектрального анализа. В результате исследования спектров были обнаружены гармоники, характеризующие наличие неисправностей, в спектрах тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля, что подтверждает возможность использования данных методов при проведении диагностирования состояния асинхронных двигателей.

Д.Ю. Лосев, соискатель PhD, ассист.,
(ТашГТУ, г.Ташкент)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ТЭС В РЕЖИМЕ LVRT

В этом исследовании оценивается устойчивость ТЭС к кратковременным снижениям напряжения в аварийных режимах в точке подключения. Требования к способности ТЭС функционировать при падении напряжения (LVRT) в точке подключения в соответствии с Правилами эксплуатации магистральных электрических сетей.

Генерирующая станция должна оставаться подключенной к энергосистеме и работать устойчиво, когда напряжение в точке подключения падает до уровня согласно характеристике на рис. 1.

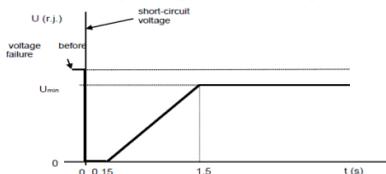


Рисунок 1. Требования к ТЭС LVRT

Смоделируем LVRT со снижением напряжения до нуля в течение 0,15 секунд для ПГУ, состоящих из 3-х генераторов. В модели внесены параметры генераторов, трансформаторов, уставки АРС, АРВ и СС. На рис. 2 показаны результаты моделирования LVRT.

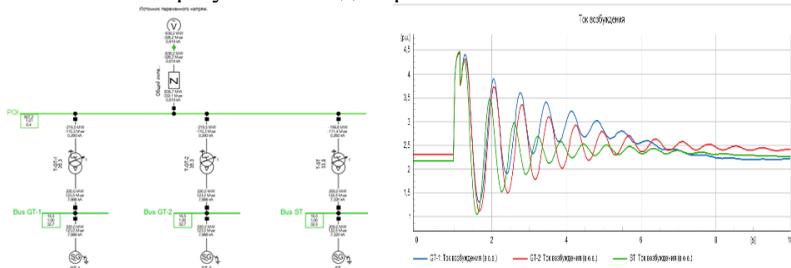


Рисунок 2. Характеристики параметров режима

На рис. 2 показаны: слева схема подключения ТЭС и справа ток возбуждения синхронных генераторов ПГУ. Из результатов расчёта можно увидеть устойчивость синхронных генераторов при LVRT.

Библиографический список

1. **Правила** эксплуатации магистральных электрических сетей Республики Узбекистан.

*Н.Н. Вахромеева, студ.; рук. А.А. Яблоков, к.т.н., доц.;
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОТ РЕАЛЬНЫХ УСВИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДОМП

Быстрота и своевременность выполнения задач оперативно-диспетчерского управления (ОДУ) имеет важное значения для поддержания работы электроэнергетической системы (ЭЭС). Аварии на объектах ЭЭС могут приводить как к ограничениям, накладываемым на режим работы оборудования и потребителей электрической энергии, так и к перерывам работы оборудования.

Определение места повреждения на линиях электропередачи напряжения относится к задачам ОДУ. Выполнение этой задачи производится с использованием осциллограмм аварийных процессов, записанных регистраторами аварийных событий (РАС) или микропроцессорными устройствами релейной защиты и автоматики. Более того, на объектах ЭЭС можно встретить фиксирующие измерительные приборы (ФИП).

Развитие централизованных систем измерений, например, системы мониторинга переходных режимов (СМНР), открывает возможность использования синхронизированных векторных измерений (СВИ) для задачи дистанционного определения места повреждения (ДОМП) [1].

Данная работа посвящена анализу эффективности применения СВИ, полученных в ходе физико-математического моделирования с использованием реальных устройств синхронизированных векторных измерений, при ДОМП и оценке эффективности разработанных методов автоматического выбора кадра СВИ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01217, <https://rscf.ru/project/23-79-01217>.

Библиографический список

1. Патент № 2813208 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ дистанционного определения места короткого замыкания на линии электропередачи и устройство для его осуществления (варианты) : № 2023111086 : заявл. 27.04.2023 : опубл. 07.02.2024 / А. А. Яблоков, И. Е. Иванов, Ф. А. Куликов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина". – EDN ЕВВОКР.

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

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Тема данной работы актуальная, так как диагностика является неотъемлемой частью эксплуатации асинхронного двигателя.

Наиболее целесообразно проводить диагностику на работающем двигателе, что позволяет заранее выявить неисправности и избежать аварийных режимов работы.

Таковыми неисправностями могут быть: короткие замыкания (однофазное и двухфазное на землю); повреждение обмоток, стержней и соединительных колец; статический и динамический эксцентриситет и другие [1].

Для изучения и разработки новых методов диагностики АД необходимо проводить исследования, применяя математическое и физическое моделирование.

Данная работа посвящена разработке стенда, позволяющего исследовать работу АД с различными неисправностями.

Стенд состоит из 3 функциональных частей:

- Физическая модель, состоящая из двух АД на одном валу. Первый АД является исследуемым, второй выступает в качестве нагрузки.
- Управляющая, которая состоит из шкафа управления, трехфазного лабораторного автотрансформатора и двух преобразователей частоты.
- Измерительная, состоящая из блока трансформаторов тока и напряжения, токовых шунтов, инкрементального энкодера, микропроцессорного терминала релейной защиты АПС МИР 100 и АЦП L-CARD E14-440.

В настоящее время реализовано моделирование обрыва стержня обмотки ротора АД и ведется работа над моделированием межвитковых замыканий и механического дисбаланса.

Библиографический список

1. ГОСТ ИЕС/ТС 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Часть 24. Онлайновое обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению.

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

ЛОКАЛЬНЫЙ НАГРЕВ КОЖУХОВ ПОФАЗНО-ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ

Экранированные (закрытые) токопроводы с воздушной изоляцией производятся различными заводами со схожими характеристиками и конструктивом. Токопроводы выполняются пофазно-экранированными (например, генераторные токопроводы) и с общим экраном (оболочкой, кожухом) для трех фаз.

Экраны (оболочки) токопроводов защищают токоведущие шины от внешних воздействий, а наведенные в них токи снижают уровень напряженности магнитного поля токопроводов.

В эксплуатационной практике достаточно часто встречаются случаи локальных перегревов кожухов пофазно-экранированных токопроводов. Выяснение причин и разработка методов их устранения становятся актуальными проблемами. Начальным этапом такой работы можно рассматривать периодическое диагностирование элементов токопроводов в процессе эксплуатации [1].

После включения токопровода под нагрузку следует проводить тепловизионный контроль первый раз через 3 месяца, а далее, согласно требованиям [1] не реже 1 раза в 3 года. При этом, до окончания гарантийного срока эксплуатации должно быть проведено не менее двух тепловизионных обследований при наибольшей возможной рабочей нагрузке токопровода.

Основным методом идентификации сигнала ЧР является акустический метод, индукционный метод является дополнительным. Наиболее вероятными зонами развития дефектов изоляторов являются участки токопроводов, подверженные перепадам температур, а также повышенным механическим нагрузкам. Перепады температур имеют место, например, при проходе токопроводов извне внутрь помещений (ЗРУ, машинного зала).

Библиографический список

1. **Диагностирование** экранированных токопроводов и токопроводов с литой изоляцией, стандарт организации «ПАО Россети», СТО 34.01-23-004-2019.
2. <https://www.zeim.ru>.
3. <https://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/2911-komplektnyy-ekranirovannyy-tokoprovod-ket.html>.

*Н.Е. Бардюков, студ.; В.А. Савельев, проф.;
(ИГЭУ, г. 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.

Также присутствует еще одна проблема: сбор информации не позволяет определить конкретное место повреждения. Именно поэтому нужно разработать новую систему, с помощью которой мы сможем оценивать концентрацию каждого вещества. Такой метод позволит определить местонахождение проблемы и оперативно ее ликвидировать.

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 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.

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

ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГЛАВНОЙ СХЕМЫ ТЭС И АЭС

Одним из направлений повышения эксплуатационной надежности электротехнического оборудования ТЭС и АЭС является переход на риск-ориентированную систему обслуживания. Первым этапом такого перехода является анализ реальных эксплуатационных показателей надежности. Такой анализ показывает, что время восстановления турбогенераторов (ТГ) составляет 95 % общего времени восстановления электрооборудования. Сопоставляя данные эксплуатации ТГ разной мощности видно, что их удельная повреждаемость по годам лежит в диапазоне от 1,0 до 4,5. Среднее время восстановления от 75 до 330 часов. Нарботка на отказ от 2200 до 10000 часов, коэффициент готовности от 94,8 до 98, 9. Параметр потока отказов у новых ТГ в 4–5 раз выше, чем у эксплуатируемых. Средняя длительность аварийного ремонта ТГ с увеличением мощности растет от 150 до 1000 и более часов. Периодичность капитальных ремонтов составляет 3–4 года для новых и 5–6 лет для осваиваемых ТГ. Ресурс отдельных узлов иногда в 2–3 раза меньше расчетного. Надежность блочных трансформаторов выше, чем ТГ и на АЭС по сравнению с ТЭС она выше примерно в 5 раз. Простой силовых трансформаторов в ремонте равномерно распределены по годам и могут существенно отличаться от нормативного простоя в текущих и капитальных ремонтах. Значительная доля аварийных отказов электрических аппаратов главной схемы у высоковольтных выключателей (64 % от общего числа аппаратов). Менее надежны выключатели напряжением 220 кВ и выше. На разъединители приходится 19 % отказов, остальные на измерительные трансформаторы тока и напряжения. С ростом напряжения надежность аппаратов заметно снижается. Надежность электрооборудования существенно зависит от качества технического обслуживания и ремонта. На это указывает сравнение числа отказов однотипного оборудования на ТЭС и АЭС.

Библиографический список

1. **Савельев, В. А.** Современные подходы к управлению техническим обслуживанием и ремонтом оборудования тепловых и атомных станций / В. А. Савельев // Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения / под ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2014. – С. 87–128.

*А.М. Логинов, студ.;рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ RUSTAB

Асинхронизированный турбогенератор (АСТГ) предоставляет интерес для эксплуатации из-за ряда преимуществ перед обычными синхронными генераторами. Так, например использование АСТГ обеспечивает высокий уровень статической устойчивости во всём допустимом диапазоне рабочих режимов, включая режимы глубокого потребления реактивной мощности [1].

Целью исследования является разработка и реализация модели энергосистемы с использованием асинхронизированного турбогенератора на базе программного комплекса RUSTab.

Задачами исследования являются:

Создание рабочей модели АСТГ на основе 4-контурной модели Парка;

Разработка регуляторов напряжения (РН) и электромагнитного момента (РЭМ), необходимых для модели возбудителя АСТГ.

Проведены расчёты основных параметров АСТГ, необходимых для создания модели, сформированы уравнения для РН и РЭМ, а также разработаны управляющие сигналы регуляторов, формируемые по осям (х,у) опорного напряжения.

Полученная модель достаточно точно отражает работу реального АСТГ и будет использована в магистерской ВКР.

Библиографический список

1. Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Сокур П.В. Целесообразность и перспективы оснащения электростанций асинхронизированными турбо- и гидрогенераторами. Научно-практическая конференция «Электроэнерго-2002»// Сборник «Электросила». – Выпуск 42.-СПб, 2003. – С. 35-43.

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

РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ДИАГРАММ

Асинхронные двигатели (АД) широко используются для привода механизмов, обеспечивающих функционирование оборудования. Их бесперебойная работа критически важна для ответственных потребителей. Одной из причин выхода из строя этих двигателей является обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора.

Ранние стадии повреждения стержней ротора сложно выявить в установившемся режиме работы двигателя из-за слабо выраженных гармонических составляющих в токе статора. Однако, учитывая прогрессирующий характер данного дефекта, несвоевременное обнаружение может привести к значительному усугублению ситуации и, как следствие, к более серьезным авариям и дорогостоящему ремонту оборудования. Своевременная диагностика на ранних стадиях развития дефекта критически важна для предотвращения внезапных отказов.

Предлагаемым решением является разработка защиты на основе анализа частотно-временного спектра тока статора, который указывает на наличие неисправностей АД при возникновении определенных гармоник [1]. С этой целью разработана тестовая модель двигателя, проведены испытания, в результате которых получены амплитуды спектров сигналов тока статора. Совместно с компанией ООО «АПС» в ПО, предназначенное для просмотра осциллограмм, «APScilloscope» добавлено построение частотно-временной диаграммы.

Следующими шагами будут: проведение испытаний на различных имитационных моделях исправных и поврежденных асинхронных двигателей; сравнение модельных результатов с данными, полученными на реальных двигателях; и анализ спектра тока статора для выявления закономерностей и уровней сигналов, характеризующих неисправность.

Это позволит разработать новый тип защит по обнаружению неисправностей АД на основе анализа частотно-временных спектров и методики 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.

*П.А. Резеньков, студ.; рук. А.А. Яблоков к.т.н., доц.,
(ИГЭУ. г.Иваново)*

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Асинхронные электрические машины получили широкое применение в промышленности, при этом известны случаи неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в электрических сетях с высокой долей двигательной нагрузки. При разработке новых УРЗА, используемых в сетях электроснабжения промышленных предприятий, необходимо применять имитационные модели асинхронных машин для проверки разрабатываемых алгоритмов.

В настоящее время в области электромеханики создано и применяется множество имитационных моделей асинхронной машины со средоточенными параметрами, составленные, как правило, в двухосном базисе α , β или d , q . Выполнение расчётов данных моделей при несимметричных режимах работы или несимметричных внутренних повреждениях требует применения преобразований к фазным координатам.

В докладе будет представлена имитационная модель асинхронной машины на основе уравнений Парка – Горева в фазных координатах. Дополнительной отличительной особенностью модели является учёт явления вытеснения тока ротора. Разработанная имитационная модель была верифицирована по справочным данным одного из применяемых в промышленности электродвигателей (табл. 1).

Таблица 1 – Верификация разработанной имитационной модели

Параметры	I_n , А	I_n , А	M_n , Н-м	M_m , Н- м	M_k , Н-м	M_n , Н-м	ω_n , с ⁻¹	s_n , %	s_k , %	$\cos\varphi_n$, о.е.
Технические данные	3960	565	1022	926	1940	1022	308	2	7.5	0.91
Результаты моделирования	3950	574	1063	875	1930	1029	308.6	1.8	7.1	0.917

Анализ таблицы 1 показывает, что расхождение результатов имитационного моделирования и технических данных электродвигателя не превышает 10% по всем основным параметрам.

СЕКЦИЯ 18

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

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

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

*Д.Н. Шаикова, студ.; рук. Ю.М. Смирнова, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПОИСК ПРИЧИН ОТКЛЮЧЕНИЯ ВЛ 35 кВ

Проблема обнаружения дефектных изоляторов на воздушных линиях электропередачи 35 кВ по причине однофазного замыкания на землю представляет собой серьезную задачу для энергетических компаний. Внешний осмотр, даже опытными специалистами, зачастую оказывается недостаточно эффективным для выявления скрытых повреждений фарфоровых или полимерных изоляторов. Если дефектных изоляторов несколько, то очень часто не удается найти место повреждения и единственным решением часто оказывается полная замена изоляционной цепочки на данном участке ВЛ. Это влечет за собой значительные финансовые и временные затраты, перебои в электроснабжении потребителей и снижение общей надежности энергосистемы.

Применение современных средств диагностики, таких как тепловизионная съемка, имеет ряд особенностей. Дефектный изолятор имеет температуру относительно окружающей среды выше, чем исправный. Из опыта эксплуатации эта разница составляет 1-3 °С. На практике выделить эту незначительную разницу температур в полевых условиях сложно, особенно при неблагоприятных погодных условиях.

Зачастую, значительные токи утечки, проходящие через поврежденный изолятор, приводят к нагреву не только самого изолятора, но и металлической конструкции опоры, особенно в местах соединения с заземлением. Практический опыт показывает, что участок стойки опоры высотой до метра от уровня грунта, а также прилегающая к опоре площадь грунта (примерно 1-1,5 м²) могут нагреваться на 3-5 °С выше температуры окружающего воздуха. Это нагревание является следствием растекания токов утечки в земле, что создает локальную "горячую точку". Именно обнаружение этих более значительных перепадов температур, связанных с нагревом опоры и грунта, а не изолятора, становится более надежным индикатором наличия дефектов.

Библиографический список

- 1. Практика** обследования ВЛ 35 кВ. Поиск причин отключения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://news.elteh.ru/arh/2021/127> (дата обращения 10.02.2025)
- 2. СТО** 34.01-23.1-001-2017.

*А.С. Коломейчук, студ.;
рук. Т.Е. Шадриков, к.т.н., доц., Беляев Г.В., ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Целью настоящей работы является разработка силового трансформатора повышенной частоты в составе зарядной станции. Как и к любому электротехническому устройству к зарядной станции предъявляются требования по ЭМС согласно ГОСТам и СанПиН или стандартам МЭК. Предельно допустимые уровни (ПДУ) напряжённости электрического поля для высокочастотных электромагнитных полей (ЭМП) установлены СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96.

Некоторые ПДУ для разных диапазонов частоты 30–300 кГц: 25 В/м.

Согласно же СанПин 2.2.4.1191-03 ПДУ для электромагнитных полей диапазона частот $\geq 10 - 30$ кГц определяется следующим образом:

ПДУ напряженности электрического и магнитного поля при воздействии в течение всей смены составляет 500 В/м и 50 А/м, соответственно.

ПДУ напряженности электрического и магнитного поля при продолжительности воздействия до 2 часов за смену составляет 1000 В/м и 100 А/м, соответственно.

Трансформатор, проектируемый для нужд зарядной станции, работает на частоте 13 кГц (оптимальная частота по технико-экономическим характеристикам трансформаторов из феррита и аморфной стали [1]). Задача исследования – спроектировать его в программном комплексе Ansys Maxwell и смоделировать электромагнитную обстановку для анализа и выбора установки его в корпусе зарядной станции.

Библиографический список

1. **Технико-экономические** показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Энергетик: журнал.— Москва: ЗАО НТФ "Энергопрогресс".— 2015.— №2. – С.11 – 15.

*И.А. Крицын, студ.;
рук. С.А. Словесный, к.т.н., доц., В.Д. Лебедев, к.т.н.,
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РЕЗИСТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Резистивные делители напряжения часто используются в измерительных системах, для масштабирования сигналов. Делитель напряжения состоит из последовательно соединенных сопротивлений – верхнего и нижнего плеч и предназначен для снижения контролируемого напряжения до заданного уровня [1].

Особенно актуально применение резистивного делителя в случаях, когда необходимо обеспечить широкий частотный диапазон измерений, включая постоянную составляющую. Для делителей ключевыми вопросами выступают точность измерений, термическая стойкость, высоковольтные свойства конструкции и применяемых материалов (отсутствии частичных разрядов).

Для решения вышеописанных задач можно использовать метод анализа электрического поля. В данной работе исследования проводились при помощи программного комплекса Comsol Multiphysics. Электрическое поле исследовалось методом решения уравнения Лапласа относительно потенциала с подбором граничных условий в 2D и 3D геометрическом пространстве. Также были использованы уравнения электрического поля в квазистатической постановке для исследования работы делителя в частотной области.

Результаты моделирования позволили визуализировать картину электрического поля и численно оценить влияние геометрических параметров и свойств материалов на работу резистивного делителя, а также выявить потенциальные проблемы, связанные с неравномерным распределением напряжения по элементам делителя или перегревом компонентов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния отдельных элементов делителя на его характеристики, а также оптимизация этих элементов для повышения точности измерений и снижения амплитудной и фазовой погрешностей.

Библиографический список

1. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М.: Энергия, 1973. 233 с.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Одной из основных дисциплин при подготовке специалистов по профилю «Высоковольтная электроэнергетика, электротехника и электрофизика» является «Высоковольтная импульсная техника». В дисциплине изучается устройство импульсных накопителей энергии и их применение в электроэнергетике и электротехнологиях. В 2024 году на кафедре ВЭТФ появился генератор импульсных токов (ГИТ) с энергией 50 кДж. С использованием ГИТ проводятся практические учебные занятия, а также планируется проведение научно-исследовательских работ обучающимися. Зарядное напряжение конденсаторов ГИТ до 100 кВ. При этом в зависимости от разрядной схемы на нагрузке формируется импульс тока до нескольких сотен кА.

В настоящее время планируется с использованием ГИТ проведение исследований по двум направлениям:

1. Испытание варисторов аппаратов защиты от перенапряжений импульсным током молнии. Испытание позволит экспериментально определять защитные характеристики варисторов, а также исследовать изменение этих характеристик при старении варисторов в условиях эксплуатации;

2. Магнитно-импульсная обработка материалов. Данное направление позволит исследовать характеристики индукторов для создания импульсных магнитных полей, а также оптимизировать режимы магнитно-импульсной обработки деталей.

Были проведены тестовые испытания ГИТ при нагрузках в виде варистора вентиляционного разрядника (PVC-35) и катушки индуктивности 8 мГн. При этом на варисторе при различных разрядных сопротивлениях и различной зарядной емкости получены стандартные импульсы тока 8/20; 4/10; 30/80 мкс, при этом расхождение в параметрах импульса не превышает 10%, что соответствует ГОСТ Р 52725-2007. При испытании на индуктивность получен колебательный импульс, что тоже соответствует исследуемому режиму работы ГИТ. Экспериментально были определены параметры разрядного контура в зависимости от разрядных сопротивлений и при различной зарядной емкости.

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

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИСТОРОВ ОПН В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Неотъемлемым элементом современных систем электроснабжения являются устройства защиты от перенапряжений. Одной из основных характеристик этих устройств является вольт-амперная характеристика применяемых варисторов. Данная характеристика может быть снята только в стационарных лабораторных условиях с использованием генераторов импульсных токов. В условиях эксплуатации, как правило, контролируется сопротивление варистора или определяется классификационное напряжение. Но в условиях эксплуатации происходит изменение характеристик варисторов, что может сказаться и на снижении уровня защиты электрооборудования.

В данной работе поставлена задача провести анализ изменения характеристик варисторов при их старении в условиях эксплуатации. Объектом исследования стали ограничители перенапряжения ОПН 600/28. Для анализа использовались две выборки ОПН по 10 штук, а именно новые ОПН и ОПН, проработавшие в условиях эксплуатации в течение нескольких лет.

Осуществлялся контроль параметров варисторов ОПН: одноминутное сопротивление постоянному току, коэффициент диэлектрической абсорбции, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$).

По результатам измерений можно сделать следующие выводы, что в процессе эксплуатации:

- сопротивление варисторов снижается в несколько раз (от $1500 \div 3500$ МОм до $300 \div 600$ МОм);
- коэффициент диэлектрической абсорбции уменьшается (от $1,3 \div 1,5$ до $1 \div 1,2$);
- емкость варисторов увеличивается до 30 %;
- тангенс угла диэлектрических увеличивается от $5,5 \div 7,5$ % до $8 \div 16$ %.

Контроль температурных зависимостей указанных параметров в пределах температур от 15 °С до 65 °С показал, что сопротивление и коэффициент диэлектрической абсорбции значительно снижаются, $\text{tg}\delta$ имеет значительный рост, а емкость увеличивается не существенно.

Дальнейшие исследования планируется проводить по контролю параметров варисторов после пропускания через них серии импульсов тока, имитирующих молниевый разряд.

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

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ОБРАЗЦАХ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В процессе эксплуатации изоляции высоковольтного оборудования происходит её электрическое старение, вызываемое воздействием повышенных температур и напряженностей электрического поля. Частичные разряды (ЧР), являющиеся основной причиной ухудшения свойств изоляции, вызывают её разрушение и, в конце концов, полный пробой изоляционной конструкции.

По мере развития дефектной зоны изменяются наиболее значимые характеристики частичных разрядов, к числу которых относятся напряжение возникновения ЧР и кажущийся заряд.

Чтобы оценить эффективность регистрации частичных разрядов требуется образец изоляции с искусственным газовым (воздушным) включением, для которого известны перечисленные характеристики частичных разрядов. Такой образец может быть изготовлен из фрагментов твердого диэлектрика, соединенных между собой таким образом, что внутри этой модели находится газовое включение с известными геометрическими размерами. Для такого образца могут быть определены расчётным путём вышеуказанные характеристики ЧР.

На основании анализа и сравнения расчётных и экспериментально полученных характеристик частичных разрядов может быть сделан вывод об эффективности конкретного средства измерения параметров ЧР. Результаты моделирования частичных разрядов в образцах твердой изоляции с искусственным включением для одного и того же образца характеризуются существенным различием (в 10 и более раз) контролируемых параметров. Для уточнения причин такого разброса изготовлена электродная система, в которой испытуемый образец находится в среде с большей, чем у воздуха, электрической прочностью (в трансформаторном масле). Такой способ регистрации частичных разрядов позволит устранить погрешность измерения, связанную с искажением электрического поля на краях модели изоляции и в прослойках между поверхностью исследуемого образца изоляции и электродами.

Библиографический список

1. **Коробейников С.М.** Физические механизмы частичных разрядов: монография / С. М. Коробейников, А. Г. Овсянников. – 2-е изд., испр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022, 266 с.

Содержание

Секция 12. Электрические системы

<i>Раматов А.Н., рук. Т.Ф. Махмудов.</i> Применение искусственных нейронных сетей для расчета установившихся режимов распределительных электрических сетей	4
<i>Лосев Д.Ю.</i> Факторы, влияющие на долгосрочный прогноз годового спроса электроэнергии энергосистемы	5
<i>Лосев Д.Ю.</i> Особенности прогнозирования параметров режима электроэнергетических систем	6
<i>Храмов А.Е., рук. Ваняев В.В.</i> Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата	7
<i>Петракова Т.В., Балаев П.А., рук. Булатов Р.В.</i> Влияние места подключения аккумуляторных СНЭЭ на условия динамической устойчивости ЭЭС	8
<i>Логинов П.А., рук. Мурзин А.Ю.</i> Особенности моделирования кабельных линий электропередачи	9
<i>Сорокин Г.С., рук. Мартиросян А.А.</i> Исследование статической устойчивости изолированной электроэнергетической системы	10
<i>Смирнов Э.А., рук. Иванов И.Е.</i> Разработка подходов для исследования динамической устойчивости ЭЭС с применением фазного координатного базиса	11
<i>Бухалов О.И., рук. Иванов И.Е.</i> Сравнительный анализ различных подходов к исследованию переходных процессов в синхронном генераторе	12
<i>Лысов Д.А., рук. Иванов И.Е.</i> Определение схемно-режимных параметров при коротком замыкании с использованием смоделированных и реальных данных синхронизированных векторных измерений	13
<i>Калашиникова А.В., рук. Иванов И.Е.</i> Исследование влияния моделей синхронного генератора в задаче анализа динамической устойчивости электроэнергетической системы	14
<i>Ахмедов Р.Р., рук. Иванов И.Е.</i> Моделирование воздушных линий сложной конфигурации и определение места повреждения с применением фазного координатного базиса	15
<i>Бабочкин В.В., рук. Братолобов А.А.</i> Анализ влияния на динамическую устойчивость ЭЭС режимов работы нейтралей трансформаторов и ШР	16
<i>Болотов В.А., рук. Мартиросян А.А.</i> Исследование методов борьбы с гололёдными обледенениями на ЛЭП	17
<i>Кузнецов А.А., рук. Кормилицын Д.Н.</i> Сравнение установившихся режимов энергосистемы с устройством продольной компенсации при различном математическом описании элементов сети	18
<i>Недвиг А.А., рук. Кормилицын Д.Н.</i> Анализ распределения напряжения вдоль воздушной линии электропередачи с управляемым устройством продольной компенсации	19
<i>Семочкин Д.А., рук. Мартиросян А.А.</i> Повышение пропускной способности ЛЭП за счет применения устройств FACTS	20

<i>Умнов Я.А., рук. Иванов И.Е.</i> Сравнительный анализ алгоритмов идентификации параметров ВЛЭП СВН с использованием реальных данных СВИ	21
<i>Суханова О.С., рук. Кормилицын Д.Н.</i> Оценка статической устойчивости синхронной двухмашинной системы с регулируемой линией электропередачи сверхвысокого напряжения	22

Секция 13. Электроснабжение

<i>Пестерев А.А., рук. Костинский С.С.</i> Снижение значения суммарного коэффициента гармонических искажений тока в сети 0,4 кВ за счет взаимокompенсации высших гармонических составляющих	24
<i>Пестерев А.А., рук. Костинский С.С.</i> Минимизации дополнительных потерь мощности в оборудовании систем электроснабжения, обусловленных несимметрией и несинусоидальностью нагрузки	25
<i>Борисова А.В., Первененок Р.Е., рук. Сицко А.Л.</i> Способ повышения качества электрической энергии в системе электроснабжения с неактивной мощностью	26
<i>Бахирева Е.С., рук. Полкошников Д.А., Кормилицын Д.Н.</i> Повышение энергоэффективности системы электроснабжения промышленных предприятий	27
<i>Титов В.А., рук. Яблоков А.А.</i> Создание псевдоизмерений в распределительных сетях 6-10 кВ	28
<i>Мальцев Р.А., Титов В.А., рук. Яблоков А.А., Сорокин А.Ф.</i> Прогнозирование электрических нагрузок для покупки электроэнергии в условиях рынка на сутки вперед	29
<i>Ужакин А.С., рук. Сорокин А.Ф.</i> Оценка эффективности применения энергосберегающих трансформаторов	30
<i>Киселёва А.С., рук. Бушуева О.А.</i> Особенности режимов электрической сети района города с распределенной генерацией	31
<i>Горбашкова М.С., рук. Сорокин А.Ф.</i> Расчет уровня несинусоидальности в системе электроснабжения производственного участка	32
<i>Губернаторова В.С., рук. Аржанникова А.Е.</i> Инновационная система напряжения 0,95 кВ	33

Секция 14. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

<i>Глазырин А.В., Воробьев Е.С., Николаев Д.В., рук. Васильева В.Я.</i> Анализ данных с помощью аналитической программы Deductor	35
<i>Глазырин А.В., Воробьев Е.С., Николаев Д.В., рук. Васильева В.Я.</i> Обучение нейронной сети в Python для идентификации электрического сигнала	36
<i>Титов В.А., рук. Яблоков А.А.</i> Групповой метод ДОМП на основе леса временных рядов	37
<i>Зимичева А.А., рук. Шуин В.А.</i> Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в смешанных кабельно-воздушных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью	38
<i>Панацатенко А.В., рук. Яблоков А.А.</i> Разработка методики тестирования УРЗА в переходных режимах КЗ с насыщением ТТ	39

<i>Сорокин Б.Р., Ширяева П.В., рук. Филатова Г.А.</i> Разработка модели сети электроснабжения промышленного предприятия в сервисе «Лаборатория РЗА»	40
<i>Потемкин И.А., Панацатенко А.В., рук. Филатова Г.А., Бобров С.Е.</i> Верификация времени точной трансформации тока, необходимого для корректной работы УРЗА	41
<i>Галанин И.А., рук. Шадрикова Т.Ю.</i> Сравнение методов вейвлет-преобразования для анализа особенностей токов однофазного замыкания на землю	42
<i>Григорьев Д.Г.</i> Тригонометрическая цифровая фильтрация гармоник	43
<i>Григорьев Д.Г.</i> Цифровая фильтрация аperiodической составляющей	44
<i>Алёшин К.С., Сёмушкин А.А., рук. Шуин В.А.</i> Исследование высших гармоник статора синхронных генераторов при замыканиях на землю в двух точках и витковых замыканиях в обмотке ротора	45
<i>Алёшин К.С., Сёмушкин А.А., рук. Шуин В.А.</i> Имитационная модель синхронного генератора для исследования ЭДС высших гармоник обмотки статора при замыканиях в обмотке ротора	46
<i>Алёшин К.С., Кузьмина Н.В., рук. Шуин В.А.</i> Токовая защита для сетей 6-10 кВ с распознаванием разновидностей замыканий на землю на основе многопараметрического подхода	47
<i>Кондратьев Д.И., Корычев А.С., рук. Лебедев В.Д.</i> Исследование характеристик катушек Роговского	48
<i>Вихарев Д.Ю., рук. Мурзин А.Ю., Родин Н.А.</i> Определение параметров вторичной обмотки трансформатора тока по вольт-амперной характеристике	49
<i>Двойников М.В., рук. Шуин В.А.</i> Моделирование алгоритма блокировки при качаниях по скорости изменения сопротивления устройств серии «Сириус»	50
<i>Кругликов В.П., Панацатенко А.В., Яблоков А.А., рук. Яблоков А.А.</i> Разработка и исследование методов интегрирования выходного сигнала катушки Роговского	51
<i>Долгих Д.А., рук. Вихарев Д.Ю., Родин Н.А.</i> Определение параметров аperiodической составляющей в токе короткого замыкания	52
<i>Тычкин А.Р., рук. Яблоков А.А.</i> Особенности организации централизованного дистанционного определения места повреждения	53
<i>Чельшев М.Е., рук. Филатова Г.А.</i> Исследование работы функции РЗА, реализованной непосредственно в цифровом блоке ЦТТН 6(10) кВ	54
<i>Цветков М.И., рук. Кутумов Ю.Д.</i> Исследование параметров и характеристик бросков намагничивающего тока трансформаторов в электрических сетях 110-220 кВ	55
<i>Крунов М.А., рук. Кутумов Ю.Д.</i> Исследование перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в электрических сетях 6-10 кВ с различными режимами работы нейтрали	56
<i>Романов Л.Р., Крюков О.В., Подшивалов Е.С.</i> Оценка причин некорректной работы устройств релейной защиты	57

<i>Бушуев М.М., Шустров А.В., рук. Лебедев В.Д.</i> Исследование характеристик магнитопроводов первичных преобразователей тока из аморфной стали для цифровых измерительных трансформаторов	58
<i>Идрисов Д.М., рук. Лебедев В.Д.</i> Анализ функционирования цифрового трансформатора при высоких значениях апериодической составляющей тока КЗ	59
<i>Идрисов Д.М., рук. Лебедев В.Д.</i> Обзор способов организации питания электронных блоков цифрового трансформатора	60
<i>Петров А.Е., рук. Лебедев В.Д.</i> Анализ переходных процессов для вычисления импеданса источника в последовательной электрической цепи	61
<i>Зверев А.А., рук. Воробьева Е.А.</i> Создание и анализ расчетной модели схемы собственных нужд блока № 3 Калининской АЭС для расчетов токов короткого замыкания в целях релейной защиты и автоматики	62
<i>Серов А.Д., рук. Бударгин Р.В.</i> Быстродействующая система балансировки мощности в силовых цепях источников электроснабжения	63
<i>Потапов А.А., Панащатенко А.В., рук. Яблоков А.А.</i> Исследование методов цифровой обработки мгновенных значений тока для целей РЗА	64
<i>Шарыгин Д.С., рук. Филатова Г.А.</i> Зона обхода для определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи 110 кВ и выше	65

Секция 15. Электротехника и электротехнологии

<i>Анисимова П.С., рук. Долгих И.Ю.</i> Разработка модели для исследования индукционного сквозного нагрева цилиндрических стальных заготовок	67
<i>Шапран А.З., рук. Долгих И.Ю.</i> Исследование процесса электроконтактного нагрева стальных заготовок на постоянном токе	68
<i>Баженов Е.Н., рук. Баженов В.С.</i> Разработка управляющего устройства механизма подачи проволоки в сварочном полуавтомате	69
<i>Антонов А.Н., рук. Лебедев В.Д.</i> Установка для испытания измерительных трансформаторов напряжения 6-10 кВ на устойчивость к феррорезонансам	70
<i>Антонов А.Н., рук. Лебедев В.Д.</i> Экспериментальная инициация субгармонического феррорезонанса в трансформаторах напряжения 6-10 кВ	71
<i>Попов А.Р., рук. Савельев В.А.</i> Об актуальности применения технологий искусственного интеллекта для диагностики силовых трансформаторов	72
<i>Попов А.Р., рук. Савельев В.А.</i> Применение технологий искусственного интеллекта для выявления дефектов в силовом электрооборудовании	73
<i>Зарипов Р.К., рук. Сидоров А.Е.</i> Зависимость уровня эмиссии высших гармоник линейных и нелинейных электроприборов от уровня несинусоидальности напряжения сети	74
<i>Клунко Ю.А., рук. Чумаков С.А.</i> Обеспечение качества электрической энергии в системах электроснабжения автономных объектов	75
<i>Голубев М.А., рук. Казаков Ю.Б.</i> Параллельная работа асинхронных двигателей на общую механическую нагрузку	76

Секция 16. Электроэнергетика: прошлое, настоящее, будущее

<i>Полушкин М.А., рук. Бушуева О.А.</i> Проблемы и преимущества распределенной генерации в системах электроснабжения	78
<i>Тимошин К.Е., рук. Бушуева О.А.</i> Проблема качества электроэнергии в системах электроснабжения различных потребителей	79
<i>Политов А.С., рук. Бушуева О.А.</i> Сравнительный анализ характеристик проводов нового поколения с традиционными проводами	80
<i>Соловьев С.Д., рук. Бушуева О.А.</i> Сравнительный анализ компактных управляемых линий электропередачи с линиями традиционного исполнения	81
<i>Ушаков Д.А., рук. Серов В.А.</i> Методы расчета потерь электроэнергии в электрических сетях	82
<i>Савельев А.Е., рук. Бушуева О.А.</i> Способы повышения эффективности систем электроснабжения промышленных предприятий	83
<i>Глазьев А.А., рук. Шадриков Т.Е.</i> Динамика рынка электрического транспорта	84
<i>Бардюков Н.Е., рук. Савельев В.А.</i> Современное состояние электроэнергетики как ключевого сектора ТЭК России	85
<i>Суляев А.Д., рук. Савельев В.А.</i> Мировые запасы и инновационные технологии использования угля на тепловых электростанциях	86
<i>Архипкин В.А., рук. Савельев В.А.</i> Состояние и новые технологии в гидроэнергетике	87
<i>Микин А.Н., рук. Савельев В.А.</i> Мировые задачи и перспективы добычи, транспортировки и переработки нефти и газа	88
<i>Сарычев К.О., рук. Савельев В.А.</i> Мировые технологии производства, транспортировки, получения и использования сжиженного природного газа (СПГ) на ТЭС	89

Секция 17. Электрооборудование и режимы электрических станций и подстанций

<i>Рождественская Е.А., рук. Страхов А.С., Полкошников Д.А.</i> Выявление динамического эксцентриситета асинхронных машин в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности	91
<i>Рождественский П.А., рук. Страхов А.С.</i> Влияние статического эксцентриситета на спектры асинхронных двигателей при различной нагрузке	92
<i>Сарычев К.О., рук. Страхов А.С.</i> Обнаружение повышенного эксцентриситета турбогенераторов на основе анализа спектра тока статора	93
<i>Отрода А.В., рук. Страхов А.С.</i> Применение преобразования Гильберта и спектрального анализа для контроля состояния асинхронных двигателей	94
<i>Лосев Д.Ю.</i> Исследование устойчивости генераторов ТЭС в режиме LVRT.	95

<i>Вахромеева Н.Н., рук. Яблоков А.А.</i> Оценка эффективности применения измерений от реальных УСВИ для задачи ДОМП	96
<i>Суляев А.Д., Смирнов Д.В., Кравченко И.В., рук. Новоселов Е.М.</i> Разработка стенда для физического моделирования неисправностей асинхронных электродвигателей	97
<i>Архипкин В.А., рук. Лапшин В.М.</i> Локальный нагрев кожухов пофазно-экранированных токопроводов	98
<i>Бардюков Н.Е., рук. Савельев В.А.</i> Новый подход к организации мониторинга силовых трансформаторов	99
<i>Ежов Д.А., рук. Савельев В.А.</i> Показатели эксплуатационной надежности электрооборудования главной схемы ТЭС и АЭС	100
<i>Логинов А.М., рук. Мартиросян А.А.</i> Моделирование асинхронизированного турбогенератора в программном комплексе RUSTAB	101
<i>Смирнов Г.Д., Евдаков А.Е., рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка защиты асинхронных двигателей на основе частотно-временных диаграмм	102
<i>Резеньков П.А., рук. Яблоков А.А.</i> Имитационная модель асинхронной машины в фазных координатах	103
Секция 18. Высоковольтная электроэнергетика и электротехника	
<i>Шашкова Д.Н., рук. Смирнова Ю.М.</i> Поиск причин отключения ВЛ 35 кВ	105
<i>Коломейчук А.С., Беляев Г.В., рук. Шадриков Т.Е.</i> Исследование электромагнитной совместимости трансформатора повышенной частоты	106
<i>Крицын И.А., рук. Словесный С.А.</i> Исследование электрического поля резистивного делителя напряжения	107
<i>Магрычев Н.С., Воронов А.В., рук. Вихарев А.В.</i> Применение генератора импульсных токов в образовательной и научно-исследовательской деятельности	108
<i>Воронов А.В., Магрычев Н.С., рук. Вихарев А.В.</i> Изменение характеристик варисторов ОПН в эксплуатации	109
<i>Агапов Е.Д., рук. Словесный С.А.</i> Анализ достоверности результатов измерения характеристик частичных разрядов в образцах твердой изоляции	110

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ДВАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ
(ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ЭНЕРГИЯ-2025»

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. 6,8.

Электронное издание

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