

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

---



# **ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА**

## **«ЭНЕРГИЯ-2024»**

**девятнадцатая всероссийская (одиннадцатая  
международная) научно-техническая  
конференция студентов, аспирантов  
и молодых ученых**

### **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**г. Иваново, 14 - 16 мая 2024 года**

**ТОМ 3**

**ИВАНОВО**

**ИГЭУ**

**2024**

УДК 620 + 621

ББК 31

Э 45

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА** // Девятнадцатая всероссийская (одинадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2024»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2024. – 127 с.

ISBN 978-5-00062-628-3

ISBN 978-5-00062-622-1 (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.

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Председатель оргкомитета:** Тютиков В.В., проректор по научной работе ИГЭУ.

**Зам. председателя:** Макаров А.В., 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; Карякин А.М. – декан ФЭУ.

**Ответственный секретарь:** Аполонский В.В.

**Координационная группа:** Вольман М.А., Мошкарина М.В., Зайцева Е.В., Сидоров А.А., Шадриков Т.Е., Аполонский В.В.

**СЕКЦИЯ 13**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

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

Секретарь – к.т.н., доцент **Иванов И.Е.**

*В.Р. Сушкова, асп.;  
рук. В.В. Сушков, д.т.н., проф.  
(ТИУ, г. Тюмень); (НВГУ, г. Нижневартовск)*

## **НОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ НАГРУЗКОЙ ПРИ НЕДОСТАТКЕ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ**

При возникновении в энергосистеме утяжеленного или аварийного режимов возможно появление дефицита активной мощности в энергосистеме, которое приводит к снижению значения частоты и может привести к лавинообразному уменьшению мощности [1].

В настоящее время при разработке графиков ограничения потребления учитывают только категории надежности потребителей [2], однако, данное обстоятельство не гарантирует минимум потерь в технологии добычи нефти и попутного нефтяного газа.

Для эффективного аварийного управления нагрузкой и уменьшения многозадачности при назначении очередности отключения потребителей предлагается комплексный подход, который представляет собой определение и присвоение ранга [1,...,5] с учетом надежности электрических сетей, погружного оборудования, устойчивости (живучести) систем нефтедобычи и др. показателей.

Разработан алгоритм по определению перечня нефтепромысловых потребителей, подлежащих отключению. Формирование очередности по ступеням производится на основании суммы рангов для каждого потребителя. При этом в первую очередь происходит отключение потребителей с наименьшей суммой рангов и величина отключаемой нагрузки не должна превышать величину ступени отключения.

Таким образом, предложен комплексный подход для составления графиков ограничения мощности. Новый подход при действии устройств автоматической частотной разгрузки (АЧР) позволяет более точно формировать величину отключаемой нагрузки нефтепромысловых потребителей для каждой ступени и уменьшить потери в технологическом процессе добычи нефти и попутного нефтяного газа.

### **Библиографический список**

1. **Андреев, В.А.** Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебник для ВУЗов / В.А. Андреев. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2007. – 639 с.
2. **Дружинин, Г.В.** Надежность устройств автоматики./Дружинин Г.В. – М.: Энергия, 1964. – 320 с.

*М.К. Ешаев, студ.;  
рук. Д.А. Алеших  
(НГТУ, Н. Новгород)*

## СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА БАЛАНСИРОВКИ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Аккумуляторные батареи (АКБ) на основе гальванических элементов (ГЭ) являются неотъемлемой частью многих устройств. Современная промышленность способна создавать ГЭ, близкие по своим характеристикам, неизбежны отклонения параметров.

Балансировка аккумуляторов требуется для того, чтобы уравновесить заряд между отдельными ячейками или элементами внутри аккумулятора и уменьшить отклонения параметров.

При использовании пассивной балансировки основным схемотехническим решением является использование транзисторного ключа с балластным сопротивлением. Зачастую такие системы статичны и не подразумевают регулирование тока. Для регулирования величины тока подразумевается использование широтно-импульсной модуляции. В связи с этим предлагаются схемы балансировки АКБ.

Схема, представленная на рис. 1,а, имеет большую точность задания среднего тока балансировки и проще в массовом производстве, однако появляются проблемы с импульсным потреблением тока балансировки и из-за этого, будет “плавать” напряжение.

Схема, представленная на рис. 1,б, более перспективная, так как решает проблему предыдущей схемы, однако из-за отличий коэффициента усиления по току сложно реализовать отработку задания по току, поэтому требуется ручная регулировка каждой цепи перед вводом в эксплуатацию.

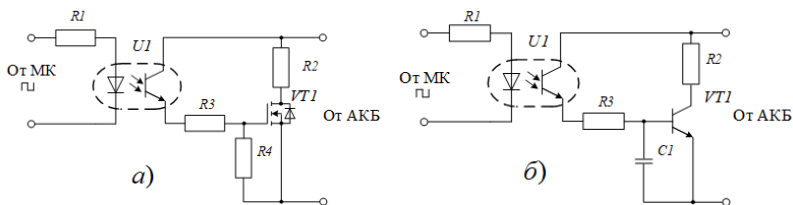


Рис. 1. Схемы балансировки на базе: (а) полевого транзистора в ключевом режиме; (б) биполярного транзистора в активном режиме

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема №ФСWE-2022-0006).

### Библиографический список

1. **Аронов, В.Л.** Полупроводниковые приборы: Транзисторы. / Аронов В.Л. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 904 с.
2. **Григорьев, О.П.** Транзисторы: Справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.

*В.А. Смазнов;  
рук. В.В. Сушков  
(ТИУ, г. Тюмень)*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ЦИКЛОМ**

Эффективное управление электропотреблением на оптовом рынке электроэнергии является ключевой задачей для нефтегазодобывающих предприятий (НГДП).

Для достижения этой цели важно выравнять генерацию и рационализировать потребление электроэнергии на предприятии.

Применение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии позволяет анализировать и планировать расход электроэнергии как на уровне всего предприятия, так и на уровне его подразделений.

Оперативное управление электропотреблением важно для технологических комплексов нефтегазодобычи, чтобы выравнять генерацию и потребление электроэнергии в реальном времени.

Для успешной работы на оптовом рынке электроэнергии необходимо предвидеть нагрузки электропотребления, что требует наличия краткосрочных и долгосрочных прогнозов электрических нагрузок предприятия.

Разработка простых и точных методов краткосрочного прогнозирования электропотребления становится все более актуальной с развитием вычислительной техники и необходимостью оперативного управления электропотреблением.

Учет специфических условий нефтяных месторождений, таких как сезонность, также играет важную роль в прогнозировании электропотребления.

Методы спектрального анализа, хотя разработаны в основном для стационарных процессов, могут быть полезны при анализе электропотребления, особенно при учете сезонности и других факторов, влияющих на потребление электроэнергии на нефтегазодобывающих предприятиях.

Анализ временных рядов электрических нагрузок и электропотребления на нефтегазодобывающих предприятиях показал, что данные ряды обычно не являются стационарными, даже если они имеют практически одинаковое поведение. Это означает, что уровень, относительно которого происходят колебания, может быть разным для различных временных интервалов (например, среднесуточные или среднемесячные данные). Поэтому для моделирования таких временных рядов рекомендуется ис-

пользовать параметрические модели, способные описывать как стационарные, так и нестационарные процессы.

Параметрические модели эффективнее не параметрических, так как они требуют оценки меньшего числа параметров и могут быть адаптированы с течением времени. Однако для использования параметрических моделей необходимо иметь достаточно полную априорную информацию о временных рядах, что может быть недоступно в некоторых случаях.

Анализ тренда временных рядов позволяет исследовать изменения среднего значения ряда и строить прогнозы на основе этих изменений. Методы анализа тренда, такие как модели, с использованием коэффициентов темпов роста и регрессионные модели, могут быть использованы для прогнозирования будущего поведения временных рядов. Однако статистический характер трендовых моделей может привести к недостаточной точности прогнозов.

Модели авторегрессии - проинтегрированного скользящего среднего (ARIMA) представляют собой комбинацию моделей авторегрессии и скользящего среднего и могут быть эффективны для описания и прогнозирования как стационарных, так и нестационарных временных рядов.

Использование статистических методов экстраполяции, основанных на выявлении тренда временных рядов, может быть полезным для прогнозирования электропотребления на нефтегазодобывающих предприятиях.

Проверка моделей на наличие тренда должна проводиться с использованием статистических критериев, таких как критерий Стьюдента и Фостера-Стюарта.

Для прогнозирования нагрузок и электропотребления на нефтегазодобывающих предприятиях часто используются трендовые модели, которые позволяют исключить влияние сезонности.

Формирование временных рядов за одинаковые месяцы или кварталы за период  $N$  лет позволяет учитывать динамику вариации показателей.

Прогнозирование на основе моделей с коэффициентами темпов роста (МКТР) часто применяется для планирования нагрузок и электропотребления на квартал и год.

Для прогнозирования на основе модели авторегрессии (AR) используется линейная комбинация предыдущих значений процесса и белого шума.

Модель скользящего среднего (MA) представляет стационарный процесс как линейную комбинацию последовательных значений белого шума. Фурье-модели, основанные на Фурье-преобразовании временных рядов в частотную область, могут быть эффективны для прогнозирования процессов с выраженными гармоническими составляющими.

**Библиографический список**

1. **Кудряшов, Р.А.** Обоснование уровней электропотребления и электрических нагрузок при проектировании электроснабжения нефтяных месторождений / Кудряшов Р.А., Новоселов Ю.Б., Фрайштетер В.П., Евсеев Д.В. – Нефтяное хозяйство, № 7, 2002. – С. 39-41.
2. **Кудряшов, Р.А.,** Новоселов Ю.Б., Фрайштетер В.П. Методы расчета удельного электропотребления в нефтедобыче. / Кудряшов Р.А., Новоселов Ю.Б., Фрайштетер В.П. – Энергетика Тюменского региона, № 1, 2003. – С. 10-15.

**В.Р. Рафиков, асп.;**  
**рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц.**  
**(ИГЭУ, г. Иваново)**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ПЕРЕХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ  
ГЕНЕРАТОРОВ ПО ДАННЫМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ  
ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Развитие технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) открывает широкие перспективы в области актуализации параметров расчетных моделей элементов электроэнергетических систем (ЭЭС), в частности, моделей синхронных генераторов (СГ). Однако стоит отметить, что классическая математическая модель синхронной машины, представленная в виде уравнений Парка-Горева, содержит довольно большое количество параметров. С целью повышения точности идентификации параметров моделей СГ, целесообразно решать данную задачу в несколько этапов: сначала определять синхронные параметры по данным измерений совокупности установившихся режимов (УР), затем рассчитывать переходные и сверхпереходные параметры СГ, а также значение постоянной инерции агрегата, по данным измерений режимных параметров переходных процессов (ПП) [1].

**Задачами исследования** являются: а) разработка алгоритма идентификации значений переходных сопротивлений и переходных постоянных времени СГ по данным СВИ переходных режимов ЭЭС; б) апробация представленного алгоритма с использованием данных СВИ режимных параметров ПП, полученных в результате вычислительных экспериментов в среде «Simulink» программного комплекса «MATLAB».

Анализ **результатов исследования** продемонстрировал высокую эффективность предлагаемого алгоритма идентификации.

**Библиографический список**

1. **Рафиков, В. Р.** Разработка метода идентификации синхронного сопротивления турбогенератора и критериев выбора состава данных синхронизированных векторных измерений / В. Р. Рафиков, И. Е. Иванов, А. Ю. Мурзин, Д. М. Дубинин // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – № 5, 2023. – С. 51-61.



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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В РАСЧЕТНЫХ ВЫРАЖЕНИЯХ ОМПА НА БАЗЕ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В исследовании [1] наглядно показано, что применение технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) при решении задачи определения места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ВЛЭП) является перспективной задачей. При этом отмечается, что при ее решении основным является вопрос выбора конкретного кадра данных СВИ, по которому расчетные выражения ОМП обладали бы наименьшей погрешностью. Во многих случаях таковым, вопреки ожиданиям, является не кадр данных с максимальным действующим значением вектора тока поврежденной фазы, а кадр непосредственно слева или справа от него (рис. 1) [1].

Целью настоящего исследования является анализ динамики изменения погрешностей в расчетных выражениях ОМП; при их реализации на базе СВИ. Для достижения поставленной цели в работе анализируется преобразование погрешностей расчета векторов токов и напряжений в соответствующие погрешности двух известных выражений ОМП (двустороннего и одностороннего).

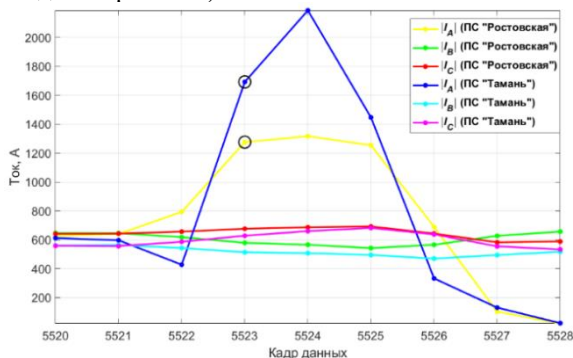


Рис. 1. Действующие значения токов при коротком замыкании на ВЛЭП 500 кВ

### Библиографический список

1. **Определение** места повреждения на воздушных линиях 500 кВ ЕЭС России по данным синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, Я.А. Умнов, А.В. Жуков, Д.М. Дубинин // Энергетик, № 7, 2023. – С. 31-39.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПО РАЗЛИЧНЫМ МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

Традиционным подходом для имитации электромагнитных и электромеханических переходных процессов (ПП) в синхронном генераторе (СГ) является использование полной системы уравнений Парка-Горева [1]. Решение этой алгебро-дифференциальной системы с учетом изменения скорости вращения ротора СГ во время электромеханического ПП и действия автоматики регулирования возбуждения (АРВ) является нетривиальной задачей. Многократное ее решение с различными входными данными необходимо, например, для идентификации параметров СГ на базе векторных измерений. Кроме того, в полном паспорте СГ обычно содержится состав данных, несколько отличающийся от требуемого [1], в частности, отсутствуют в явном виде сопротивления демпферных контуров. В связи с этим возникает задача вычисления требуемых значений параметров через специальные формулы пересчета.

Учитывая изложенное, *целью исследования* является разработка универсальной математической модели для анализа электромагнитных и электромеханических ПП в СГ, а также использование этой модели для исследования ПП в крупных СГ, функционирующих в составе Единой энергосистемы России. Верификация модели осуществляется, главным образом, с применением программного комплекса «MATLAB/Simulink». На первом этапе работы реализованы и успешно протестированы на модельных данных алгоритмы, позволяющие рассчитать ПП при коротком замыкании с учетом либо постоянства скорости вращения ротора СГ ( $\omega = \text{const}$ ), либо постоянства механической мощности турбины ( $P_T = \text{const}$ ). Следующей задачей является тестирование разработанной модели СГ при коротких замыканиях в расчетной схеме многомашинной энергосистемы.

### Библиографический список

1. **Рафиков, В.Р.** Физико-математическое моделирование переходных процессов в синхронном генераторе с применением синхронизированных векторных измерений / В.Р. Рафиков, И.Е. Иванов, А.А. Братолобов // Вестник Ивановского гос. энергетич. ун-та, № 3, 2021. – С. 22-32.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «MATLAB/SIMULINK»**

Обеспечение динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) является важной задачей для поддержания надежного функционирования ЭЭС и предотвращения крупных системных аварий. Нормативным документом [1] регламентирован состав т.н. «нормативных возмущений», учитываемых при анализе устойчивости ЭЭС. При моделировании нормативных возмущений, связанных с однофазными короткими замыканиями (КЗ) на линиях электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения, возникает нетривиальная задача учета продольной и поперечной несимметрии, одновременно присутствующих в расчетной схеме. Наиболее гибкое и полноценное решение данной задачи возможно при моделировании всей серии динамических переходов, вызванных КЗ, по полной модели ЭЭС в фазных координатах, что, тем не менее, традиционно остается за рамками учебно-исследовательских расчетов.

*Целью работы* является исследование динамической устойчивости многомашинных ЭЭС при различных возмущающих воздействиях, в том числе – предписываемых указаниями [1], в среде имитационного моделирования «MATLAB/Simulink». В ходе работы определяются оптимальные варианты представления моделей элементов ЭЭС (в частности, воздушных ЛЭП), а также опции решения (расчет мгновенных значений или т.н. «векторный» вариант расчета).

На первом этапе исследования сформированы имитационные модели одномашинной и трехмашинной ЭЭС. Полученные зависимости изменения угловых соотношений между роторами синхронных генераторов успешно верифицированы сравнением с аналогичными данными из программных комплексов «Mustang» и «RUSTab». Наиболее эффективным режимом моделирования оказался векторный расчет «Discrete phasor».

### **Библиографический список**

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

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

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ НА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП**

Типичная длительность короткого замыкания (КЗ) на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения составляет 2,5–4 периода промышленной частоты [1, 2]. В связи с этим возникает проблема быстрого и точного выделения параметров основной гармоники токов и напряжений аварийного режима, что особенно актуально в задаче определения места повреждения (ОМП) ЛЭП, традиционно решаемой по параметрам аварийного режима (ПАР). Помимо этого, интерес представляет оценка постоянной времени затухания экспоненциальной составляющей тока КЗ.

*Целью исследования* является разработка и тестирование алгоритма, позволяющего рассчитать параметры синусоидальной и экспоненциальной составляющей аварийного сигнала тока (напряжения) по соответствующим оцифрованным осциллограммам КЗ. Алгоритмы реализуются в программном комплексе «MATLAB», а для их верификации используются как смоделированные сигналы, так и осциллограммы, полученные при КЗ на ЛЭП сверхвысокого напряжения Единой энергосистемы России.

На первом этапе исследования реализованы и успешно протестированы на модельных данных две версии алгоритма, в одной из которых аналитически решается нелинейная система уравнений, а в другой – нелинейная оптимизационная задача. Составной частью обоих алгоритмов является функция автоматического определения момента времени возникновения КЗ.

Следующей задачей является тестирование функционирования алгоритмов на реальных осциллограммах, агрегированных с ЛЭП 500 кВ, и имитация ОМП по полученным ПАР.

### **Библиографический список**

1. **Исследование** практических аспектов ОМП на ЛЭП сверхвысокого напряжения по векторным измерениям на базе RTDS / А.А. Яблоков, И.Е. Иванов, Ф.А. Куликов и др. // Вестник ИГЭУ, №. 5, 2022. — С. 33-43.
2. **F.V. Lopes, A. Mouco, R.O. Fernandes, and F.C. Neto**, "Real-World case studies on transmission line fault location feasibility by using M-Class phasor measurement units," Electric Power Systems Research, – vol. 196, pp. 1–7, April 2021..

Л.А. Харламова, студ.;  
рук. А.А. Братолобов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЧАСТЕЙ ЭЭС ПРИ РАСЧЕТАХ КЗ

При заданной конкретной точке КЗ в переходный процесс изменения токов и напряжений вовлекаются лишь близко лежащие к ней элементы ЭЭС. Поэтому расчетная схема может быть ограничена только этими элементами. Остальная часть (части) ЭЭС при этом должна быть представлена эквивалентным источником (источниками) с ЭДС  $E_c$  и реактивностями прямой  $X_{c1}$  и нулевой  $X_{c0}$  последовательностей относительно шины примыкания (рис. 1).

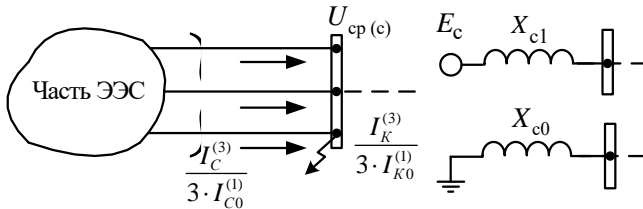


Рис. 1. Эквивалентирование части ЭЭС по известным токам КЗ её шин примыкания

Показано что, в случае известных токов при КЗ на шинах примыкания, параметры эквивалента в относительных единицах определяются следующими формулами.

$$\text{Прямая последовательность: } E_c = 1, 0; \quad X_{c1} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{cp(c)} \cdot I_c^{(3)}}.$$

$$\text{Обратная последовательность: } X_{c2} = X_{c1}.$$

Нулевая последовательность:

$$X_{c0} = \frac{3 \cdot I_{k0}^{(1)}}{3 \cdot I_{c0}^{(1)}} \cdot \frac{S_6}{U_{cp(c)}} \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot I_{k0}^{(1)}} - \frac{2}{\sqrt{3} \cdot I_k^{(3)}} \right).$$

Здесь  $S_6$  – базисная мощность (МВА);  $I_6$  – ток КЗ от эквивалентированной части системы (кА);  $U_{cp(c)}$  – среднее номинальное напряжение шин примыкания (кВ).

В докладе анализируется также погрешность такого эквивалентирования при наличии шунтирующих связей между эквивалентами.

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

## **ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ О КЗ И ОАПВ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 500 КВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Синхронизированные векторные измерения (СВИ) применяются, главным образом, для анализа нормальных электроэнергетических режимов и электромеханических переходных процессов (ПП). В ряде отечественных и зарубежных исследований получены данные, свидетельствующие о перспективности использования СВИ для регистрации параметров электромагнитных ПП [1]. На воздушных линиях (ВЛ) 500 кВ устройства СВИ (УСВИ) подключаются к линейным измерительным трансформаторам, что позволяет обеспечить полноценный мониторинг серии «динамических переходов», вызванных коротким замыканием (КЗ) на ВЛ с последующим отключением поврежденной фазы и ее повторным включением.

*Целью работы* является выявление соотношений между схемно-режимными параметрами с использованием данных СВИ, которые позволили бы получить более информативную картину о КЗ и ПП во время бестоковой паузы в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). *Задачами исследования* являются:

- анализ общих соотношений между режимными параметрами, рассчитанными УСВИ при КЗ и в цикле ОАПВ;
- оценка величины переходного сопротивления в точке КЗ, а также сопротивлений эквивалентированных систем;
- выявление критериев, которые могут применяться для определения типа возникшего КЗ (устойчивое или неустойчивое) и, потенциально, для оценки необходимости повторного включения отключенной фазы ВЛ.

Все исследования выполнены на базе реальных архивов СВИ, полученных от УСВИ на различных ВЛ 500 кВ Единой энергосистемы Российской Федерации.

### **Библиографический список**

1. **Определение** места повреждения на воздушных линиях 500 кВ ЕЭС России по данным синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов, Я.А. Умнов, А.В. Жуков, Д.М. Дубинин // Энергетик, № 7, 2023. – С. 31-39.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДЕЛЕЙ УЗЛОВ ГЕНЕРАЦИИ И НАГРУЗКИ В ЗАДАЧЕ УТЯЖЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ЭЭС**

Проверка выполнения требований к обеспечению устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) должна проводиться как при планировании развития ЭЭС, так и при управлении электроэнергетическим режимом [1]. При утяжелении режима ЭЭС в целях выявления предела статической устойчивости обычно используют формализованный подход, заключающийся в расчете серии установившихся режимов методом Ньютона. При этом пренебрегают статизмом автоматики регулирования возбуждения (АРВ) синхронных генераторов (СГ) и используют факт расходимости итерационного процесса в качестве индикатора достижения «предельного» режима. Кроме того, упрощенно учитывается располагаемая реактивная мощность СГ, а обобщенная нагрузка задается определенной статической характеристикой (СХН), в простейшем случае – постоянной мощностью. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько существенными являются различия траекторий утяжеления режима ЭЭС при использовании упрощенных моделей узлов генерации и различных моделей нагрузочных узлов. Цель работы заключается в исследовании данного вопроса.

На первом этапе работы решена задача по анализу влияния типовых моделей обобщенной нагрузки ( $S = \text{const}$ ,  $\underline{Z} = \text{const}$ ,  $J = \text{const}$ ) на траекторию изменения режимных параметров простейшей ЭЭС. С применением программных комплексов «СИМЭС» и «Mustang» выяснено, что «предельный» режим фактически не зависит от СХН, а основным определяющим фактором является учет располагаемой реактивной мощности СГ.

На следующих этапах работы планируется исследование статической устойчивости многомашинной ЭЭС с различными моделями обобщенной нагрузки и уточненным учетом АРВ СГ.

### **Библиографический список**

1. **Электроэнергетические** системы. Учебное пособие для диспетчерского персонала / Под общей редакцией главного диспетчера АО «СО ЕЭС» М.Н. Говоруна. – М.: ЗАО «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ», 2021. – 684 с., ил.

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

## НАВЕДЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ В ОТКЛЮЧЁННОЙ ВЛ ПО СОСТАВЛЯЮЩИМ ВЛИЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КАК ФУНКЦИЯ РЕЖИМА ЕЁ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Рассматривается пример двухцепной ВЛ-220 кВ одна из цепей которой отключена для ремонта, а другая, влияющая цепь, имея по середине транспозицию фаз, работает в нормальном установившемся режиме.

Путём моделирования в программной среде MATLAB-SIMULINK исследуется распределение наведенного напряжения ( $U$ ) в одной из фаз по длине отключенной цепи в зависимости от режима её заземления (рис.1):  $a$  – единственное заземление (место работ отмечено стрелкой),  $b$  – заземление в РУ по концам цепи ВЛ,  $в$  – заземление в РУ по концам цепи ВЛ и на месте работ,  $г$  – без заземления. При этом выделяется ёмкостная составляющая в наведённом напряжении ( $U_c$ ), полученная при ХХ влияющей цепи через её электрическое поле, и индуктивная составляющая ( $U_L$ ) магнитного поля как  $U_L = U - U_c$ .

Отмечается самый низкий уровень наведённого напряжения (15 В, рис.1, $a$ ) при однократном заземлении, однако внезапное его отключение представляет большую опасность (2390 В, рис.1, $г$ ).

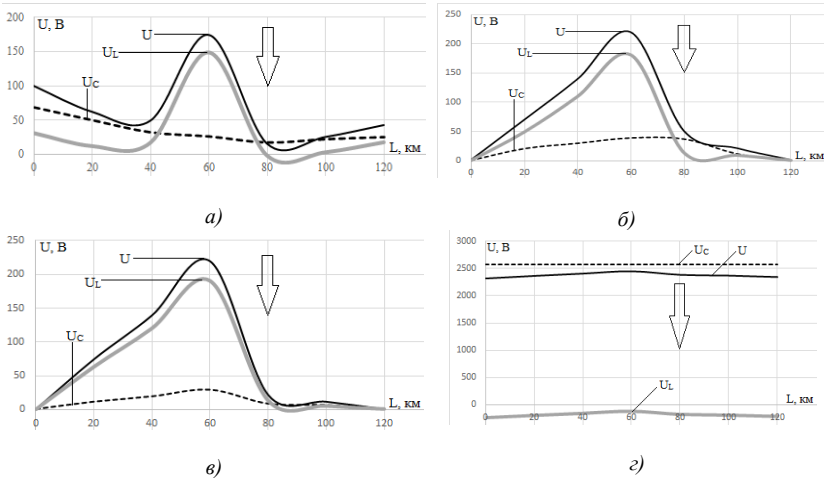


Рис.1. Распределение наведённого напряжения по длине отключенной ВЛ в зависимости от режима её заземления ( $a$ ,  $б$ ,  $в$ ,  $г$ )



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

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЭС С МОДЕЛИРОВАНИЕМ АРВ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Обеспечение динамической устойчивости является одним из ключевых аспектов надежного и бесперебойного функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС). Целью исследования является разработка (с соответствующей формализацией в программном коде на языке «MATLAB») модели для имитации электромеханических переходных процессов (ПП) простейшей ЭЭС с учетом автоматики регулирования возбуждения сильного действия (АРВ СД) синхронного генератора (СГ). Работа является развитием ранее выполненного авторами исследования, в котором СГ был представлен упрощенной моделью (постоянством переходной электродвижущей силы). Актуальность работы обосновывается, во-первых, сложностью либо полным отсутствием возможности автоматизированных исследований устойчивости в имеющихся программных комплексах (в частности, «Mustang»), а во-вторых, целесообразностью учета АРВ СД в максимально простой схеме ЭЭС (с перспективой развития модели).

Разработанный алгоритм верифицирован путем моделирования нескольких сценариев ПП и сравнением расчетных кривых с соответствующими результатами программы «SSST», разработанной ранее в ИГЭУ (рис. 1).

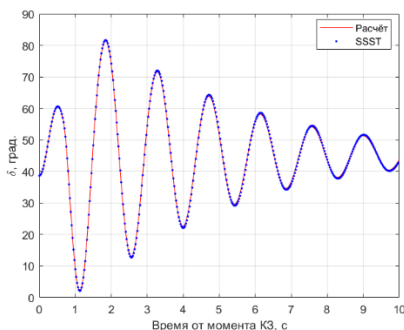


Рис. 1. Изменение угла ротора СГ, полученное двумя сравниваемыми алгоритмами

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

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РЕЖИМА И ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОМАШИННОЙ ЭЭС**

При анализе динамической устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) возникает нетривиальная задача определения «предельных» режимных параметров (предельное время существования короткого замыкания, максимальная загрузка синхронных генераторов в доаварийном режиме). В учебном проектировании эта задача обычно решается методом подбора, предполагающим ручное пошаговое наращивание определенного параметра с «прогоном» модели, визуализацией и анализом результатов на каждом шаге. Данный вид исследования, целесообразный с точки зрения общего понимания физической природы электромеханических переходных процессов (ЭМПП), неэффективен при постановке задачи автоматизированного исследования динамической устойчивости многомашинной ЭЭС. Программные средства, традиционно применяемые для исследования ЭМПП (например, «Mustang»), также не обеспечивают простого интерфейса для создания сценариев, предполагающих многократный запуск модели с автоматическим подбором «предельного» режима.

Учитывая изложенные обстоятельства, *задачей исследования является* разработка и реализация в программном коде алгоритма, позволяющего обеспечить автоматический поиск максимального значения параметра, заданного пользователем, с точки зрения сохранения динамической устойчивости многомашинной ЭЭС (с наличием или отсутствием т.н. «шин бесконечной мощности»). На первом этапе работы синхронные генераторы представляются классическими моделями ( $E' = \text{const}$ ). Разработаны и успешно верифицированы отдельные функции, позволяющие обеспечить расчет доаварийного режима методом Ньютона, редукцию схемы и автоматический поиск предельного времени существования короткого замыкания в различных точках расчетной схемы ЭЭС. Следующим этапом работы является создание алгоритма для автоматического расчета эквивалентных сопротивлений отдельных последовательностей при несимметричном КЗ.

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

## **ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НА ПРЕДЕЛ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЭС**

Одной из актуальных задач в современной энергетике является управление потоками мощности. Актуальность задачи объясняется необходимостью повышения надежности и качества электроснабжения за счет повышения пропускной способности линий электропередачи и снижения потерь мощности. В процессе проектирования электроэнергетических сетей в соответствии с [1] требуется учитывать запас статической устойчивости по активной мощности, поскольку устойчивость режима оказывает влияние на надежность ЭЭС.

Цель данной работы – выявление зависимости влияния настройки автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и количества шунтирующих реакторов на выводах управляемого устройства продольной компенсации (УУПК) на предел передаваемой мощности и напряжения электропередачи сверхвысокого напряжения.

В работе рассматривалась модель простейшей электроэнергетической системы, состоящей из эквивалентного генератора без автоматического регулирования возбуждения, работающего на шины бесконечной мощности через повышающий трансформатор и двухцепную линию электропередачи 500 кВ.

В ходе исследования получены угловые характеристики активной мощности, передаваемой по линии электропередачи сверхвысокого напряжения, как при различных вариациях коэффициента регулирования АРВ, так и при вариациях количества реакторов на УУПК. Выявлены факторы, влияющие на изменение предела передаваемой мощности и напряжения вместе установки УУПК. Произведена оценка влияния на предел передаваемой мощности.

### **Библиографический список**

1. **Приказ** Министерства энергетики РФ от 3 августа 2018 г. № 630 Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем».

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

## **РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РЯЗАНСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ УСТАНОВКЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРА СВЯЗИ НА РЯЗАНСКОЙ ГРЭС**

Рязанская ГРЭС – одна из крупнейших ГРЭС в России, её установленная мощность 3024 МВт. Станция работает в составе объединённой энергетической системы Центра и осуществляет выдачу мощности в сети 500 и 220 кВ. От шин среднего и высокого напряжений Рязанской ГРЭС отходят 6 ЛЭП 220 кВ и 5 линий 500 кВ.

В настоящее время максимально допустимая нагрузка энергоблоков, работающих на шины 220 кВ, ограничена критерием не превышения допустимой токовой нагрузки ВЛ 220 кВ, отходящих от Рязанской ГРЭС.

С целью увеличить максимально допустимую нагрузку энергоблоков, работающих на 220 кВ, предлагается реконструкция станции, а именно установка автотрансформатора связи 500/220.

В работе выполнены расчеты электрических режимов Рязанской энергосистемы при различной температуре наружного воздуха на Рязанской ГРЭС. Электрические режимы выполнены для нормальной и ремонтных схем.

Проведена оценка полученных результатов, а также сделан вывод о том, что установка автотрансформатора связи на Рязанской ГРЭС позволит снять наложенные ограничения на энергоблоки 220 кВ.

Полученные результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при подготовке квалифицированных кадров для электроэнергетической области.

### **Библиографический список**

1. **Приказ** Минэнерго России от 03.08.2018 № 630 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем».

2. **Приказ** Минэнерго России от 08.02.2019 № 81 «Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики».

3. **Стандарт** организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.010.004-2020. Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПА ВОССТАНОВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ТУРБИНЫ ПРИ ИРТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЭС

В докладе на примере простейшей ЭЭС рассмотрено влияние скорости восстановления мощности турбины при импульсной её разгрузке (действии ИРТ) на устойчивость системы.

Показано, что существует предельная скорость, т.е. темп восстановления мощности турбины по условию сохранения синхронного режима. Так, рис. 1,а демонстрирует сохранение устойчивости ЭЭС при достаточно низком темпе восстановления мощности турбины, а рис. 1,б показывает потерю синхронного режима при превышении предельного темпа восстановления мощности при прочих равных условиях.

Показано также, что глубина разгрузки турбины при ИРТ мало влияет на величину предельно допустимого темпа восстановления мощности. Это видно из рис. 2, на котором представлены графики восстановления мощности турбины с предельной допустимой скоростью при различной глубине ИРТ.

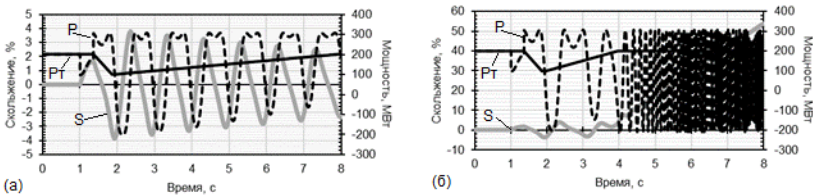


Рис. 1. Динамические переходы при восстановлении мощности турбины с темпом:  
 (а)– 17 МВт/с – устойчиво; (б)– 50 МВт/с – неустойчиво

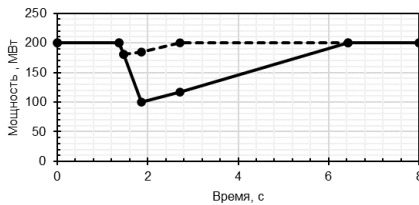


Рис.2. Кривые ИРТ при глубине разгрузки 10% и 50%.

**СЕКЦИЯ 14**  
**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

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

Секретарь – старший преподаватель  
**Полкошников Д.А.**

*Р.А.Добренский, студ.;*  
*рук. Ю.П. Юренков, к.т.н., доц.*  
*(УлГТУ, г. Ульяновск)*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРЕПОДАВАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «АВТОМАТИ- ЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРО- СНАБЖЕНИЯ»**

Исследование рабочих программ российских университетов по дисциплине "Автоматизация проектирования систем электроснабжения" показало, что высшие учебные учреждения не преподают построение систем электроснабжения в автоматизированных комплексах проектирования, задействующих систему информационного моделирования ВІМ. Существует ряд проблем связанных с внедрением ВІМ – технологий в России [1].

Необходимо обновлять сборники практических работ по дисциплине, чтобы включить в них последние достижения, результаты исследований и передовой опыт в этой области. Обновляя информацию, студенты и специалисты-практики могут быть в курсе самой актуальной и необходимой информации, гарантируя, что они хорошо подготовлены к решению реальных проблем и возможностей. Кроме того, новые практикумы могут дать новые представления, идеи и методологии, которые, возможно, не были доступны в старых материалах, улучшая общий опыт обучения и способствуя постоянному совершенствованию САПР является человеко-машинной системой, и поэтому успех автоматизации проектирования зависит от реализации эффективного взаимодействия человека и средств вычислительной техники, что позволяет:

- повысить точность и исключить ошибки в расчетах;
- обеспечить выбор оптимального варианта;
- ускорить подготовку проектной документации. [2]

По завершению исследования, было разработано методическое пособие направленно на углублённое изучение ВІМ проектирования.

### **Библиографический список**

1. Дронов, Д. С. и др. Проблемы внедрения ВІМ- технологий в России / Дронов Д. С. И., Киметова Н.Р., Ткаченко В. П. Синергия наук, № 10, 2017. — С. 529-549.
2. Аветисян Д.А. Автоматизация проектирования электрических систем. – М.: Высш. шк., 1998. – 331 с.

*Т.А. Айзатуллин, студ.;*  
*рук. Ю.П. Юренков, к.т.н., доц.*  
*(УлГТУ, г. Ульяновск)*

## **УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ЗАПРАВКИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ**

Жидкометаллические самовосстанавливающиеся предохранители (ЖСП) предназначены для ограничения силы тока при коротком замыкании. Жидкий металл в предохранителях создаёт высокое сопротивление при нагреве, превращаясь в газ и образуя металлический пар для защиты оборудования [1].

Действующая методика заправки предохранителя описана в статье [2]. В методике есть недостатки. Один из них заключается в том, что передвижение поршня шприца происходило скачкообразно из-за прямого воздействия на шприц человеком тем самым, образовывались пустоты внутри ЖСП. Второй недостаток состоит в том, что конструкция была неустойчива. Во время заправки вся конструкция нагревается до 100°C и любое неосторожное движение может привести к остановке процесса и потерям в натрии, аргоне и др. материалам.

Для решения данных недостатков была проведена оптимизация заправки. Чтобы не было резких скачков, была разработана сборно-разборная конструкция, которая жестко связывает ЖСП шприц и перчаточный бокс в единую деталь. Благодаря этому перечисленные недостатки были устранены. Удалось достичь жесткого крепления и плавного втягивания шприца.

Подводя вывод, можно сказать, что был успешно оптимизирован процесс заправки предохранителя. Предохранитель был заправлен по новой методике. Отсутствие пустот проверено с помощью рентгеновского аппарата.

### **Библиографический список**

1. **Кузнецов, А.В.** Применение жидкометаллических самовосстанавливающихся ограничителей тока для энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии / Кузнецов А.В., Юренков Ю.П. // Вестник УлГТУ, № 1 (85), 2019.– С. 54–58.
2. **Кузнецов, А.В.** и др. Технологические проблемы изготовления макетных образцов жидкометаллических предохранителей / Кузнецов А.В., Юренков Ю.П., Аглиулов А.И. // Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2021. – С. 317-318.



Д.Ю. Глуханич, асп.;  
рук. А.А. Бельский, к.т.н., доц.  
(СПГУ, г. Санкт-Петербург)

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПУНКТА ТЕЛЕМЕХАНИКИ НЕФТЕПРОВОДА

Современная нефтегазовая промышленность сталкивается с необходимостью обеспечения электроснабжения удаленных объектов, таких как пункты телемеханики (ПТМ) на нефтепроводах [1].

Для решения этой проблемы предлагается применение электротехнического комплекса (ЭТК) с фотоэлектрической (ФЭУ), термоэлектрической (ТЭУ) установками и аккумуляторной батареей (АКБ). Были разработаны методика выбора номинальных параметров и имитационная модель [2], позволяющие выбрать комбинацию источников ЭТК, удовлетворяющую требованиям к обеспечению бесперебойности работы ПТМ, а именно нулевой вероятности потери нагрузки из-за недостатка генерирующих мощностей в течение календарного года. За базисное значение при моделировании была принята мощность электрической нагрузки ПТМ 65 Вт.

На рис. 1 представлены номинальные параметры ЭТК, для примера расположенного в Туруханском районе Красноярского края. Температура транспортируемой нефти 65°C, диаметр нефтепровода 390 мм. По критерию нормируемой себестоимости электроэнергии (*LCOE*) определен оптимальный состав ЭТК: установленная мощность ФЭУ 4,85 о.е. (при СУИ), ТЭУ 2,56 о.е. (при  $\Delta T=100^\circ\text{C}$ ) при максимальном времени работы от АКБ 3,7 часа, *LCOE* 12 руб/кВт·ч.

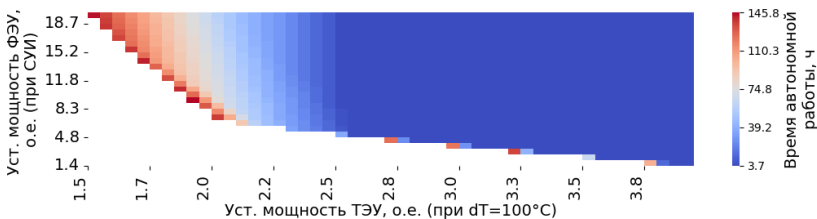


Рис. 1. Комбинации ЭТК, обеспечивающие бесперебойное электроснабжение ПТМ

### Библиографический список

1. **Stroykov G., Cherepovitsyn A.Y., Iamshchikova E.A.** Powering Multiple Gas Condensate Wells in Russia's Arctic: Power Supply Systems Based on Renewable Energy Sources // Resources. 2020. Vol. 9, № 11. – P. 130.
2. **Belsky A.A., Glukhanich D.Y.** Standalone power system with photovoltaic and thermoelectric installations for power supply of remote monitoring and control stations for oil pipelines // Renewable energy focus. Elsevier BV, 2023. Vol. 47. – P. 100493.

*Е.С. Кривенко, студ.;  
рук. М.Л. Артемьева, ст. препод.  
(Чукотский филиал СВФУ, г. Анадырь)*

## ПОДЪЕМНИК НА ОПОРУ ЛЭП

Задача: создание встроенного подъёмника в опору ЛЭП для ремонтных работ проводов, изоляторов, арматур.

Позволяет обходиться без специальной машины и имеется быстрый доступ к трем фазам, нежели при использовании специальной машины, или при помощи лестницы и лаз/когтей.

К середине траверсы, между балками, устанавливается поднимающее устройство, работающее по типу лифта. Лифт работает на двух подъемных двигателях. Сами двигатели запитаны к аккумуляторным батареям, которые встроены в них. Батареи непосредственно подключены к ЛЭП на постоянной зарядке. Так как для работы на ЛЭП линию отключают от напряжения, то аккумуляторы становятся в качестве питающего устройства для двигателей.

Платформа для поднятия работника раскладная и переносная. Место, куда устанавливается платформа, будет у каждой ЛЭП/подъемника. Поднимает платформу двигатель прочными железными канатами. Управляется с помощью дистанционного пульта двумя функциями: подъем и спуск.

Расположение лифта после подъема дает доступ только к одной фазе, а остальные две фазы находятся по краям. Для доступа к ним, установлены под проводами к столбам перекладины с периллами. Прежде чем работнику сойти с платформы на перекладину, он должен зацепиться защитой за периллы.

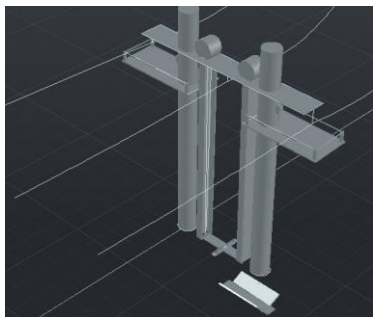


Рис. 1. Общий вид подъемного устройства на опоре ЛЭП

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

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ СИЛЫ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

На практике для оценки несимметрии силы токов и напряжений в распределительных электрических сетях используют метод симметричных составляющих (МСС) [1], но сложная его реализация и аппаратное определение углов может послужить источником появления дополнительной погрешности.

Для устранения указанных недостатков применения МСС, в работе [2] предложен метод определения симметричных составляющих, основанный на обработке синхронизированных мгновенных измерений фазных напряжений или токов (ММЗ) и базирующийся на классическом методе симметричных составляющих, но без определения угловых соотношений между векторами трехфазной системы, однако эмпирического обоснования, подтверждающего преимущество применения ММЗ, не представлено.

В ходе экспериментального исследования, выполненного в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной синусоидальной нагрузке, были получены данные о распределении относительных погрешностей расчета силы тока нулевой последовательности при использовании МСС и ММЗ (рис. 1).

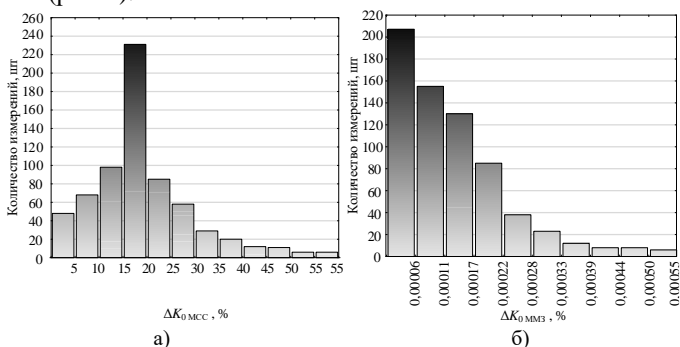


Рис. 1. Гистограмма распределения совокупностей величин относительных погрешностей расчета силы тока нулевой последовательности, при использовании: а) МСС; б) ММЗ

### Библиографический список

1. Fortescue C.L. Metod of Symmetrical Coordinates. TAIEE. 1918. – 1027 p.
2. Петров, А.В., Костюков, Д.А. Способ цифровой обработки трехфазного сигнала для выделения симметричных составляющих // ВСКФУ. 2022. № 3(90). С. 7-15.

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

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ СИЛЫ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

В настоящее время сети с номинальным напряжением 0,4 кВ эксплуатируются в условиях наличия значительного количества нагрузки, имеющей нелинейный характер. На практике для оценки несимметрии силы токов и напряжений в распределительных электрических сетях используют метод симметричных составляющих (МСС) [1], имеющий ряд недостатков, особенно при наличии высших гармонических составляющих в спектрах измеряемых сигналов.

Для устранения указанных недостатков применения МСС, в работе [2] предложен метод определения симметричных составляющих, основанный на обработке синхронизированных мгновенных измерений фазных напряжений или токов (ММЗ). Однако эмпирического обоснования, подтверждающего преимущество применения ММЗ, не представлено.

В ходе экспериментального исследования, выполненного в случае амплитудно-фазовой несимметрии при активно-индуктивной несинусоидальной нагрузке, были получены данные об относительных погрешностях расчета силы тока нулевой последовательности с использованием МСС и ММЗ (рис. 1).

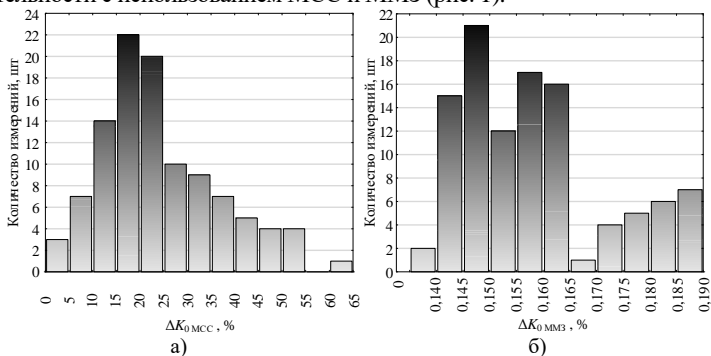


Рис. 1. Гистограмма распределения совокупностей величин относительных погрешностей расчета силы тока нулевой последовательности, при использовании: а) МСС; б) ММЗ

Значение медианы для исследуемой совокупности величин, полученных с использованием МСС, составило 21,25 %, а для совокупности величин, полученных при использовании ММЗ – 0,16 %.

### Библиографический список

1. Fortescue C.L. Method of Symmetrical Coordinates. TAIEE. 1918. – 1027 p.
2. Петров А.В., Костюков Д.А. Способ цифровой обработки трехфазного сигнала для выделения симметричных составляющих // ВСКФУ, № 3(90). 2022. – С. 7-15.

*М.А. Бабакин, Т.К. Игумнов, студ.;*  
*рук. Н. Н. Смотров, к.т.н., доц.*  
*(НИУ МЭИ)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОТЕЛЬНОЙ**

Одной из важнейших составляющих проектирования электроснабжения какого-либо объекта является определение коэффициента использования при расчёте нагрузок. Правильно подобранный коэффициент использования позволяет, во-первых, избежать тех ситуаций, когда спроектированная система снабжения находится в режиме перегрузки, что приведет к срабатыванию защит от перегрузки, во-вторых, ситуаций, где электроустановки сильно недогружены, что экономически нецелесообразно.

Проводя расчёт нагрузок котельной при проектировании электрической части была выявлена проблема поиска коэффициента использования для некоторых электроприёмников, а именно: горелок котлов, повысительных насосов, котловых насосов и насосов сырой воды. При этом нормативным документом, для определения подходящего коэффициента использования является справочник по расчётным коэффициентам электрических нагрузок М788- 1069/ ВНИПИ

Тяжпромэлектропроект, 1990 г.

Приведем пример выбора коэффициента использования для горелки: в вышеприведённом документе коэффициент использования есть только для вентиляторов газовых горелок доменного цеха, который составляет 0,65. При этом технологический процесс металлургического производства отличен от технологического процесса котельной для жилого здания, из-за чего данный коэффициент использования непригоден для определения расчётной нагрузки горелки котельной. Если опираться на опыт проектировщиков котельных, то рекомендуемым коэффициентом использования будет приниматься 0,85. Очевидно, что если бы мы выбрали коэффициент использования горелки как для доменного цеха, то система электроснабжения проектируемой нами котельной была бы всё время в состоянии перегрузки.

Коэффициенты использования для повысительных насосов, котловых насосов и насосов сырой воды найдены не были. В качестве коэффициентов использования, рекомендуются: 0,8, 0,7 и 0,7 соответственно.

### **Библиографический список**

1. **Справочные** данные по расчётным коэффициентам электрических нагрузок М788-1069/ ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1990 г.

*Е.В. Марков, асп.;*  
*рук. В.В. Вахнина, д.т.н., проф.*  
*(ТГУ, г. Тольятти)*

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ПО МЕТОДУ IEC 60599:2022 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Метод IEC 60599:2022 основан на использовании соотношений газов и треугольных функций для построения нечеткой модели интерпретации дефектов силовых масляных трансформаторов [1].

Использование входных треугольных функций принадлежности для переменных  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  и  $C_2H_2/C_2H_4$  обеспечивает удобство интерпретации результатов. Выходная функция принадлежности представляет возможные дефекты трансформатора и их коды, согласно методу IEC 60599:2022 [1].

Метод IEC 60599:2022 использует нечеткий вывод с антецедентом и следствием, основанный на правилах нечеткого вывода.

Результат нечеткого вывода, полученный с использованием алгоритма Мамдани, представляет собой набор нечетких правил, связывающих входные и выходные переменные с учетом операций минимизации и максимизации [2].

Визуализация разработанных нечетких правил на трехмерных графиках позволяет анализировать влияние комбинаций входных переменных на выходные значения.

Верификация разработанной модели на 15 образцах масла из резервуаров силовых трансформаторов показала, что метод IEC 60599:2022 на основе нечеткой логики обладает точностью интерпретации дефектов в 86,6 % случаев, превышая эффективность оригинального метода IEC 60599:2022.

Результаты верификации дефектов, сопоставленные с применением оригинального метода IEC 60599:2022 и нечеткого моделирования по методу IEC 60599:2022, подтверждают эффективность и точность разработанной модели для интерпретации дефектов в силовых трансформаторах с использованием метода IEC 60599:2022.

### Библиографический список

1. **Chang C., Lim C., Su Q.** Fuzzy-Neural Approach for Dissolved Gas Analysis of Power Transformer Incipient Faults // Australian Universities Power Engineering Conference. Brisbane, Australia. 2004.
2. **Hmood S.** Standardization of DGA interpretation techniques using fuzzy logic approach // Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). 2012. – P. 929 – 932.

*А.А. Самойлова, студ.; А.Г. Тимофеева, асп.;  
рук. А.А. Антонов, к.т.н., доц.  
(НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ВИЭ В ЕЭС РОССИИ**

Применение гибридных систем накопления электроэнергии (ГСНЭ) может оказывать положительное влияние на работу энергосистемы и повышать надежность электроснабжения потребителей.

На примере участка сети 110 кВ с недостаточным резервированием схемы электроснабжения потребителей при одиночных отказах воздушных линий электропередачи (ВЛ) была проведена оценка эффективности использования ГСНЭ, состоящей из аккумуляторной батареи (АБ) и суперконденсатора (СК), в составе солнечной электростанции (СЭС) в качестве резервного источника питания.

В случае отказа или ремонта ВЛ потребители ПС Д длительное время могут оставаться без электроснабжения, в связи с чем имеется проблема электроснабжения социально-значимых потребителей.

В исследовании проводилось экономическое сравнение двух вариантов: строительство второй цепи ВЛ 110 кВ до ПС Д и установка СЭС с ГСНЭ. По полученным расчетам, установка ГСНЭ, включающая литий-ионную АБ мощностью 0,8 МВт и емкостью 8 МВт·ч и СК емкостью 0,22 кВт·ч, а также строительство СЭС мощностью 8 МВт составляет 970,34 млн рублей [1], в то время как строительство второй цепи ВЛ составляет 1 880,21 млн рублей [2], что экономически не выгодно.

Исходя из оценки ожидаемых ремонтных и аварийных отключений ВЛ [3], а также периодических испытаний ГСНЭ в течение 30 лет, общее количество отключений ГСНЭ составляет 167 циклов, что не превышает установленного ресурса циклов заряда/разряда у АБ и СК.

### **Библиографический список**

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 08.01.2009 № 1-р (В редакции от 24.03.2022 № 594-р) «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года».

2. **Приказ** Минэнерго России от 26.02.2024 № 131 «Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства».

3. **Стандарт** организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007- 29.240.01.271-2019 от 24.07.2019 «Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. Эталоны обоснований».

**В.И. Солюянов**  
(АО «Татэлектромонтаж», г. Казань)

## **ВВЕДЕНИЕ В НОРМАТИВНУЮ БАЗУ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК АГЛОМЕРАЦИИ «Г. МОСКВА – МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ»**

Совершенствование нормативной базы является одной из приоритетнейших задач в строительной отрасли, позволяющее возводить современное, комфортное, энергоэффективное и безопасное жилье [1]. Сравнение фактических и расчетных электрических нагрузок жилых зданий демонстрирует значительные их расхождения более, чем в 2 раза [2, 3]. В связи с этим были выполнены двухлетние натурные измерения электрических нагрузок многоквартирных жилых домов разной этажности г. Москвы и Московской области. Статистически подтвержденные результаты исследования демонстрируют необходимость снижения электрических нагрузок жилых зданий, а также объединения г. Москвы и Московской области в единую агломерацию [4]. На основании выполненных исследований были разработаны новые удельные электрические нагрузки для агломерации «г. Москва и Московская область», которые введены в действие путем утверждения приказа Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28.12.2023 № 1005/пр изменений № 6 к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

Технико-экономический эффект от внедрения результатов исследования заключается в снижении капитальных расходов строительных компаний на системы электроснабжения жилых микрорайонов.

### **Библиографический список**

1. Солюянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика. 2022. № 4. – С. 20-28. EDN HXYLKK.
2. Ахметшин А.Р., Солюянов Ю.И., Федотов А.И. и др. Расчет удельных электрических нагрузок жилых зданий на основании фактических замеров // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. Т. 25, № 4. – С. 313-323. EDN AHMDJR.
3. Солюянов Ю.И., Федотов А.И., Чернова Н.В. и др. Анализ фактических электрических нагрузок объектов индивидуального жилищного строительства // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 5(68). – С. 60-65. EDN DXVKQM.
4. Солюянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // Электричество. 2023. № 7. – С. 52-65. EDN IQAFRE.



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

## **СНИЖЕНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

В связи с ростом доли нелинейных нагрузок в электрических сетях возрастает вероятность функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения, поэтому необходимо внедрять мероприятия по повышению качества электроэнергии [1].

Целью работы является снижение несинусоидальности напряжения на участке распределительной сети системы электроснабжения агломерационной фабрики металлургического комбината, имеющий две трансформаторные подстанции, и стороннюю нелинейную нагрузку, генерирующую высшие гармоники.

Искажение формы кривой питающего напряжения обусловлено падениями напряжений в сопротивлениях трансформатора на этапах коммутации вентиля тиристорного преобразователя.

Для достижения необходимой цели были проанализированы возможные варианты по решению проблемы. Произведен расчет участка сети в программном комплексе Simulink без применения фильтрокомпенсирующих устройств и с ними. Для подавления генерируемых гармоник были рассчитаны параметры фильтро-компенсирующих устройств.

В результате расчетов получены графики напряжения в сети. Для оценки уровня несинусоидальности рассчитан коэффициент гармонических составляющих до 40-го порядка  $K_{U(n)}$  и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  %.

При использовании ФКУ суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на участке распределительной сети на 12%.

### **Библиографический список**

1. Коваленко Д. В. Применение пассивных фильтров для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий – URL: [<https://moluch.ru/archive/123/34071/>].

*Д. В. Титов, Я. Р. Коломиец, студ.;  
рук. Ю. П. Юренков, к.т.н., доц.  
(УлГТУ, г. Ульяновск)*

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА



Рис. 1. Модель системы электроснабжения частного дома

Данная модель показывает работу системы электроснабжения жилого дома на отдельных элементах в реальном времени.

Работы, которые выполняются на данной модели:

1 работа – Моделирование перегрузки на автомате с номинальным током (2 А). Любая нагрузка, которая меньше 2 А, например зарядник, у которого ток 1 А, не будет отключаться. Однако, если взять большую нагрузку, например строительный фен  $P=1800$  Вт, автомат отключится, приблизительно через 8 с.

2 работа - Фотореле предназначено для включения освещения в ночное время суток, например уличный фонарь. Для эксперимента мы искусственно создадим ночное время суток, накроем фотореле чёрным пакетом.

3 работа – В данной работе, дифференциальный автомат отключается при возникновении тока утечки, что возникает при подключении 2-й лампочки, ее фазы, через дифференциальный автомат, а ноль – общий. А 1-я лампочка, будет подключена через дифференциальный автомат и фазой, и нулем.

4 работа – Включение нагрузки с помощью магнитного пускателя и трансформатора.

5 работа – Возможность в реальном времени снимать показания счетчика, наблюдать работу его при нагрузке.

В данной работе была получена образовательная физическая модель, на которой студенты могут понять и ознакомиться с основными элементами системы электроснабжения в частном доме.

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

## **ВЫЯВЛЕНИЕ НЕЛЕГАЛЬНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Потери от хищений электроэнергии в электрических сетях – одна из наиболее существенных составляющих коммерческих потерь. Этой проблеме уделяется большое внимание, так как эти потери электроэнергии приводят к значительным финансовым убыткам.

Основными способами выявления очагов хищения электроэнергии в распределительных электрических сетях является ручной анализ потребления электроэнергии и осмотр приборов учета потребителей выездными бригадами, что занимает большое количество времени [1].

Целью работы является разработка модели машинного обучения, которая на основе анализа исходной информации распознает предполагаемых нелегальных потребителей электроэнергии, а затем полученная информация используется для окончательного решения.

Разработан алгоритм, который основан на комплексном анализе показаний приборов учета электроэнергии. Достаточным условием функционирования алгоритма является наличие архива данных о показаниях приборов учета электроэнергии по лицевым счетам потребителей.

Использование в качестве исходных данных показаний приборов учета электроэнергии, переданных потребителями, или полученных в процессе регулярного обхода выездными бригадами, обуславливает отсутствие необходимости в дорогостоящих АИИС КУЭ для определенных групп потребителей.

Созданная модель машинного обучения была использована для анализа электропотребления потребителей города Иркутска с целью выявления предполагаемого нелегального потребления электроэнергии.

Разработанный алгоритм для машинного обучения рекомендован к использованию в сетевых компаниях ПАО «Россети» и ПАО «ЭН+ГРУП».

### **Библиографический список**

1. **РИ БП 10.4/02-06/2020.** Организация и выполнение контроля/мониторинга качества электроэнергии, оформление и анализ результатов. – М.: ПАО "Россети Центр"и ПАО "Россети Центр и Приволжье", 2020. – 43 с.

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

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫЯВЛЕНИЯ ХИЩЕНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Хищение электроэнергии одна из острых проблем в распределительных сетях. Так ПАО «Россети Юг» за 2023 год в период с января по сентябрь пресекли свыше 900 фактов незаконного потребления электроэнергии общим объемом 17,4 млн кВт·ч, что на 27 % превышает аналогичный показатель прошлого года [1].

Основными способами локализации очагов хищения электроэнергии на данный момент является ручной анализ показаний приборов электроэнергии, либо же организуются рейды с целью выявления очагов хищения электроэнергии [2].

Целью работы является разработка алгоритма автоматического выявления очага хищения электроэнергии на основе математического моделирования участка электрической сети и при помощи интеллектуальных приборов учета электроэнергии.

Функционирование алгоритма основывается на моделировании режимов работы электрической сети 0,4 кВ, с автоматически обновляемыми нагрузками потребителей. Итерационный расчет балансов мощности на выбранном фидере с учетом потерь электроэнергии в линиях дает возможность выявить очаги хищения.

Получен алгоритм выявления очагов хищения электроэнергии на основе итерационных расчетов. Дальнейшая работа будет направлена на доработку алгоритма, где будет реализован локализация нескольких очагов хищения электроэнергии, находящихся на одном фидере.

Данный алгоритм может быть использован в сетевых компаниях ПАО «Россети», ПАО «ЭН+ ГРУП».

### **Библиографический список**

1. ПАО «Россети Юг»: сайт. – URL: <https://rosseti-yug.ru/novosti/rosseti-yug-v-2023-godu-presekli-khishchenie-17-mln-kvt-ch-elektroenergii/> (дата обращения: 18.04.2024).
2. РИ БП 10.4/02-06/2020 Организация и выполнение контроля/мониторинга качества электроэнергии, оформление и анализ результатов. – М.: ПАО "Россети Центр" и ПАО "Россети Центр и Приволжье", 2020. – 43 с.

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

## **ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 кВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Основной задачей работы является выбор оптимального места подключения системы накопления электроэнергии (СНЭ) для получения максимального эффекта улучшения качества электроэнергии и повышения технико-экономических показателей электрической сети.

Выполнен анализ видов систем накопления электроэнергии и решаемых ими задач. Проанализированы существующие проекты использования СНЭ [1].

Рассмотрено применение СНЭ на участке сети системы электроснабжения деревни Подталицы Ивановского района после технологического присоединения небольшого производства с расчетной мощностью 50 кВт. Электроснабжение деревни осуществляется по КВЛ 0,4 кВ от КТП с трансформатором ТМГ-400.

Для решения основной задачи выполнен расчет участка электрической сети в программном комплексе «Энергия УР» для различных режимов работы потребителей. Произведено сравнение показателей качества электроэнергии при установке СНЭ в различных местах:

- 1) В начале участка КВЛ 0,4 кВ от КТП;
- 2) В середине участка КВЛ 0,4 кВ от КТП;
- 3) В непосредственной близости от энергоемкого потребителя электрической энергии.

Выбрано оптимальное место размещения, определены периоды времени заряда и разряда СНЭ для решения поставленных задач.

### **Библиографический список**

1. **Абрамов, А.Ю. и др.** Экспертно-аналитический отчет. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры. / Абрамов, А.Ю., Богаченко, П.В., Куликов, А.В., Ряпин, И.Ю. // Под ред. Д.В. Холкина, Д.А. Корва. – М.: изд-во IDEА Библиотека (по заказу инфраструктурного центра EnergyNet), 2019. – 157 с.

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

## **ВВЕДЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМАХ**

Внедрение автоматизированных информационно-измерительных систем учета электроэнергии (АИИС УЭ) в многоквартирных жилых домах (МЖД) позволяет автоматически собирать данные для своевременного выявления хищения и неучтенного потребления электроэнергии (ЭЭ), что снизит трудозатраты управляющих компаний.

Произведена разработка АИИС УЭ в МЖД путем выбора средств учета ЭЭ и расчета экономической эффективности внедрения АИИС УЭ. АИИС УЭ условно можно разделить по каналам связи на два вида: проводные (RS485 и PLC) и беспроводные (GSM). Выбор оборудования проводной и беспроводной АИИС УЭ произведен в соответствии с требованиями [1].

Экономическая эффективность проводной (RS485) и беспроводной (GSM) АИИС УЭ рассчитана с помощью метода дисконтированных затрат. Основные показатели расчетов указаны в табл. 1.

**Таблица 1. Основные показатели экономической эффективности**

Тип связи	Показатель			
	Чистый дисконтированный доход (руб.)	Индекс доходности инвестиций	Простой срок окупаемости (лет)	Дисконтированный срок окупаемости (лет)
RS485	622904,9	1,57	4,39	5,8
GSM	302302,3	0,41	8	13,2

При расчетах проводной АИИС УЭ учтена прокладка дополнительных резервных линий связи для увеличения надежности системы, при отключении основных линий связи.

Анализ полученных результатов показывает, что использование АИИС УЭ с каналом связи GSM, экономически нецелесообразно. Экономически целесообразно использовать АИИС УЭ с каналом связи RS485. Данный проект внедрения АИИС УЭ с каналом связи RS485 начнет приносить чистую прибыль на 6 год эксплуатации.

Полученные результаты могут использоваться при внедрении и/или реконструкции систем электроснабжения в МЖД Ивановской области.

### **Библиографический список**

1. **СТО** 34.01-5.1-009-2021 «Приборы учёта электроэнергии. Общие технические требования». Стандарт организации ПАО «Россети».

*А.А.Пучкова, маг.;*  
*рук. А.Е. Аржанникова, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## ПОКАЗАТЕЛИ И ТЕНДЕНЦИИ ВНЕДРЕНИЯ АМОРФНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Основные потери в распределительной сети — это потери в трансформаторах, которые складываются из потерь в магнитопроводах (холостого хода) и нагрузочных потерь - потерь в обмотках.

На сегодняшний день применение аморфных материалов для магнитопроводов – наиболее перспективное направление энергосбережения применительно к распределительным трансформаторам.

ООО «НПК «АВТОПРИБОР» производит линейку аморфных трансформаторов ТМГ-АП инновационного класса энергоэффективности Х4К3 со значением потерь холостого хода меньше в 3,75 раза, чем у лучших энергосберегающих трансформаторов с сердечниками из холоднокатаной стали, с большим КПД и сроком службы 50 лет.

Расчет зависимости удельных потерь от коэффициентов загрузки для ТМГ-АП показал, что наиболее эффективны они для сезонных потребителей электроэнергии и при загрузке в пределах 50% (рис.1).

В настоящее время в ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» установлено 310 аморфных трансформаторов, что показывает разработанная автором во время практики информационная панель (дашборд). Она служит платформой для оперативного мониторинга применения аморфных трансформаторов – в табличном виде и на географической карте отображает количество установленных аморфных трансформаторов во всех филиалах, план на текущий год по реконструкции и монтажу и эффект от замены трансформатора в кВтч (рис.2).

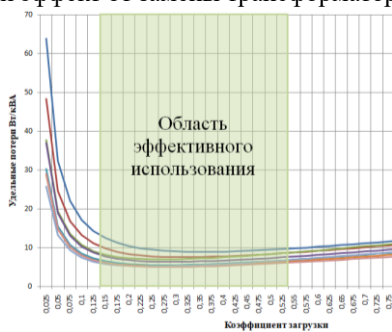


Рис.1

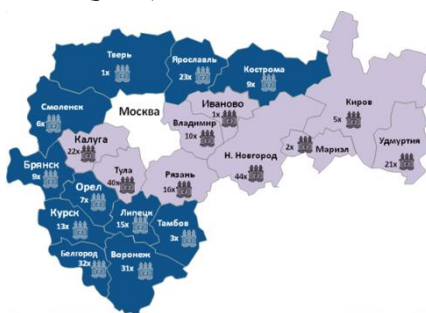


Рис.2

**СЕКЦИЯ 15**

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Председатель – к.т.н., доцент **Лебедев В.Д.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Филатова Г.А.**



*Е. Е. Полторацкий, студ.;  
рук. М. Л. Артемьева, ст. препод.  
(Чукотский филиал СВФУ, г. Анадырь)*

## **ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЯ НА ДИСТАНЦИОННУЮ ЗАЩИТУ ЛЭП**

Гололёдно-изморозевые отложения оказывают косвенное влияние на систему защиты ЛЭП. При выходе из строя вышеуказанной будет невозможно оперативно определить место обрыва и произвести ремонтные работы.

ГИО для ЛЭП классифицируют по следующим признакам: по физическому происхождению изморози (кристаллическая или зернистая); по плотности (матовый, стекловидный, замерзший мокрый снег и т.д.

Известно, что на работу определения места повреждения дистанционной защиты влияет переходное сопротивление. В свою очередь, переходное сопротивление зависит от погодных условий. Поэтому целью данного исследования является анализ и расчет нагрузки от голодных отложений на проводах ЛЭП в условиях Арктики, а именно на Чукотке. Погодные данные брались за 2022 год. В процессе анализа выяснилось, что гололедные образования зависят от погодных условий (температура воздуха, ветер, осадки) и геометрических показателей линии электропередачи (высоты подвеса, диаметра провода и т.п.). Даже топография местности имеет влияние, и течения в атмосфере имеют важное значение. ГИО приводят к критическим нагрузкам на кабели и опоры ВЛ, что вызывает их повреждение.

В результате анализа и расчета были получены данные нагрузки от гололедообразования на опорах ЛЭП для климатических условий Чукотки. Предложены методы борьбы с ГИО, такие как удаления льда с помощью пропускания по проводам сильного тока, как переменного, так и постоянного. Эффективность этого метода зависит от точности метеоданных, к примеру, о количестве и плотности наледи. Так же известен способ удаления льда путем нагрева проводов токами высокой частоты, при этом в проводе увеличивается плотность тока и его температура при меньших затратах энергии. Растапливание льда рекомендуется при толщине ледяной стенки на проволоке в среднем более 25 мм. Для удаления небольших слоев ГИО применяются роботы, перемещающиеся по проводам.

В процессе выполнения работы было установлено, как гололедно-изморозевые отложения влияют на работу ЛЭП, были разобраны методы противодействия.

*Д.Г. Григорьев, асп.;*  
*рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЕКТОРА ТОКА**

Одной из важнейших задач в релейной защите является быстрое и точное определение токов в переходных режимах для срабатывания или несрабатывания защиты. Замедленное срабатывание или несрабатывание защиты повлияет на устойчивость режима энергосистемы и дальнейшую сохранность оборудования, подверженного протеканию токов КЗ. Благодаря всё более широкому внедрению микропроцессорных терминалов, стандартным подходом к определению протекающих в сети токов стало использование синхронизированных векторных измерений, основанных на применении оконного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с обработкой отсчётов за 1-3 периода промышленной частоты, а так же полупериодного ДПФ [1]. Известен метод получения значения вектора сигнала при использовании двух выборок и численного вычисления производной по ним [2]. Был предложен метод получения вектора всего по одной выборке, но при применении дополнительного датчика, измеряющего производную тока [3].

Применение производной в алгоритме приводит к появлению погрешностей, зависящих от частоты дискретизации сигнала и частоты сигнала в сети. Усиливаются высокочастотные шумы, амплитуда измеренного тока изменяется при различной частоте сети, усиливаются компоненты высших гармоник в сигнале измеренного тока, а так же изменяется отклик на апериодическую составляющую в токе. Остро встаёт задача определения и устранения этих погрешностей.

Для её решения было произведено численное моделирование сигналов тока и его производной с учётом возможных погрешностей. Полученные значения тока и его производной имеют разный отклик на различные виды погрешностей.

### **Библиографический список**

1. **T. R. Honorato and K. M. Silva**, "Half-Cycle DFT-based Phasor Estimation Algorithm for Numerical Digital Relaying," 2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasília, Brazil, 2018, – pp. 1-4, doi: 10.1109/WCNPS.2018.8604396

2. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.: ил. ISBN 978-5-283-03256-6

3. **Д. Г. Григорьев, В. Д. Лебедев.** Способ получения вектора тока с применением цифрового измерительного трансформатора // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тридцатая междунар. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов (29 февраля – 2 марта 2024, г. Москва): тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2024. – 1342 с. – С. 1234.

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

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ 6–10 кВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Методы машинного обучения, а именно аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) все более широко используется для решения задач разработки и совершенствования защит электроэнергетических систем, в том числе определения места повреждения (ОМП). Задача совершенствования методов ОМП наиболее актуальна для электрических сетей среднего напряжения 6-10 кВ, поскольку является наиболее сложной в первую очередь из-за особенностей электромагнитных переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Параметры электрических величин контура нулевой последовательности, используемых для выявления ОЗЗ, зависят от режима заземления нейтрали сети (изолированная нейтраль, резонансное заземление через дугогасящий реактор, различные варианты резистивного заземления нейтрали и др.), а также разновидности ОЗЗ - устойчивые (металлические или через переходное сопротивление), дуговые неустойчивые (дуговое перемежающееся, дуговое прерывистое, кратковременное самоустраняющееся ОЗЗ).

Для правильного функционирования ОМП на основе ИНС главной задачей является обучение на корректной и полной обучающей выборке данных с учетом возможных изменений условий функционирования. Для получения необходимых данных на основе «Стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС». Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. СТО 56947007-29.120.70.241-2017» в программном комплексе MATLAB разработана математическая модель сети 6-10 кВ, схема которой представлена на рис. 1.

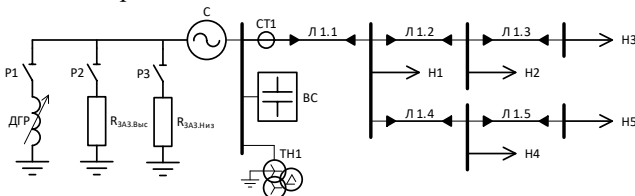


Рис. 1. Участок сети для формирования обучающей выборки

Модель по рис. 1 предусматривает возможность изменения режима заземления нейтрали сети, вида и места ОЗЗ, суммарного емкостного тока сети, а также уровней высших гармоник в напряжении.

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ ПРИ РАСЧЕТАХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

При проектировании релейной защиты (РЗ) управляемых шунтирующих реакторов (УШР) возникает необходимость расчета токов короткого замыкания (КЗ) при КЗ во внутренних узлах УШР. При этом необходимо учитывать различие в принципах действия и конструктивные особенности УШР.

В отечественной электроэнергетике известны два типа УШР – управляемые подмагничиванием магнитопровода (УШРП) и трансформаторного типа (УШРТ).

По конструктивному исполнению основные составные части существующих УШР являются маслонаполненным оборудованием наружной установки, аналогичным силовым трансформаторам и реакторам.

При одинаковом принципе действия в зависимости от класса напряжения и мощности УШР различаются по количеству и схеме соединения обмоток, конструкции, составу оборудования и т.д. Следовательно, и математические модели для таких УШР будут различны.

Разработаны математические модели УШРТ и УШРП в фазном координатном базисе для расчета токов при внешних и внутренних КЗ, учитываемых при проектировании РЗ управляемых шунтирующих реакторов с учетом их конструктивных особенностей.

Трехфазные модели УШРТ учитывают: трансформации  $Y/\Delta$  и  $Y/Y$  сетевых и вентильных обмоток; режим заземления нейтрали сетевой обмотки для УШРТ напряжением 35 кВ и 110 кВ и выше.

Трехфазные модели УШРП учитывают: возможное совмещение компенсационной обмотки (КО) и обмотки управления (ОУ) (для УШР 110 кВ и ниже); раздельную работу КО и ОУ (для УШР 220 кВ и выше); трансформации  $Y/\Delta$  между СО и КО УШР и трансформатора подмагничивания; режим заземления нейтралей сетевой обмотки реактора и трансформатора подмагничивания.

### **Библиографический список**

1. Долгополов, А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы. Принцип действия, конструкции, режимы работы, релейная защита и автоматика. – М.: ООО ИД ЭНЕРГИЯ, 2015. – 272 с.
2. Кондратенко, Д.В. Повышение эффективности применения УШР на ЛЭП 500 кВ и ПС 110 кВ электроэнергетической системы / Дисс. канд. техн. наук. – М.: НИУ «МЭИ», 2015.

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА**

Неотъемлемой частью исследований разработанных алгоритмов определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима (ПАР) на мгновенных значениях [1] является проведение сопоставительного анализа с другими алгоритмами ОМП. В результате такого анализа выявляются преимущества и недостатки каждого алгоритма как в зависимости от отдельно взятого влияющего фактора на точность ОМП, так и в их совокупности. Анализ факторов, определяет погрешность методов ОМП и величину зоны обхода ЛЭП.

Были проведены исследования 12 алгоритмов одностороннего и 20 алгоритмов двухстороннего ОМП. Сравнение алгоритмов ОМП выполнялось с наиболее часто встречаемыми алгоритмами ОМП, основанными на использовании (в случае двухстороннего ОМП – синхронизированных) векторных значений токов и напряжений. Формирование векторных величин выполнялись на основе модели R-фильтра. Исследование совокупности факторов с использованием и без использования уточненных параметров ЛЭП осуществлялось при помощи метода Монте Карло – заданием значений факторов случайным образом.

В данной работе для осуществления дальнейшего формирования зоны обхода исследовалась не только методическая, но и инструментальная составляющая погрешности ОМП. Для проведения исследований использовалась верифицированная модель электромагнитного ТТ, построенная на базе конструктивных параметров и кривой намагничивания стали, при сравнении с результатами экспериментальных исследований реального ТТ [2]. В общей сложности было обработано ~ 100 000 экспериментальных исследований КЗ.

### **Библиографический список**

1. **D. Sharygin, G. Filatova and A. Yablokov.** Implementation of Justified Inspection Zone for Fault Location on Overhead Transmission Lines of 110 kV and Above, 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2024, – pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE60449, 2024. 10479762.

1. **Яблоков, А. А. и др.** Разработка имитационной модели трансформатора тока с использованием его паспортных характеристик и ВАХ // Международная научно-техн. конф.: Релейная защита и автоматика энергосистем /А.А. Яблоков, А.Р. Тычкин, А.В. Панащатенко, С.Е. Бобров, 2023. Сб. докладов. – М.: АО СО ЕЭС, 2023. – С. 586.

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

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОМПЛЕКСОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

Одним из основных направлений государственной политики Российской Федерации в условиях санкционного давления является развитие топливно-энергетического комплекса (ТЭК). В качестве средств для модернизации и увеличения эффективности объектов ТЭК предпочтение отдается внедрению различных цифровых технологий и средств автоматизации, которые позволяют улучшить управляемость и прогнозируемость энергетических систем при эксплуатации.

В свою очередь комплексы релейной защиты и автоматики (РЗА) занимают одну из центральных ролей при внедрении средств автоматизации в электроэнергетические системы, так как они предназначены для ликвидации повреждений и аварийных режимов. Однако функционирование систем электроснабжения промышленных предприятий и других объектов ТЭК имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проектировании, наладке и эксплуатации систем РЗА [1].

Еще одной особенностью обеспечения надежной и корректной работы комплексов РЗА является разработка подходов к оценке показателей надежности при помощи специальных математических моделей и методов моделирования. В докладе рассмотрены два перспективных метода моделирования, а именно:

1. Логико-вероятностный метод, основанный на построении структурной блок-схемы комплекса РЗА в виде совокупности элементов, соединенных особым образом, а также использовании данных о надежности её компонентов;

2. Метод цепей Маркова, при котором показатели надежности системы не являются постоянными величинами при строгом определении пространства состояний.

### **Библиографический список**

1. **Ипполитов, В.А. и др.** Способ диагностики электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики цифровых подстанций // Автоматизация и ИТ в энергетике. /Ипполитов В.А., Погодина С.А., Романов Л.Р., Крюков О.В., 2023. – № 8(169). – С. 32-41.

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

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И СТРУКТУРА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ**

**Введение.** Актуальность применения централизованных устройств защиты от замыканий на землю (ЦУЗЗ) в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения обосновывается уменьшением удельных (на одно присоединение) расходов на выполнение защиты, упрощением ее эксплуатации и проектирования в сравнении с индивидуальными устройствами защиты.

### **Основные требования к ЦУЗЗ:**

1. Универсальность, т.е. возможность применения защиты в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.
2. Селективное определение поврежденного присоединения при всех разновидностях однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).
3. Селективное определение ОЗЗ на шинах защищаемого объекта.
4. Непрерывность действия при устойчивых и наиболее опасных для сети дуговых перемежающихся ОЗЗ.
5. Распознавание разновидностей ОЗЗ в целях выбора наиболее эффективного способа ликвидации повреждения.

**Обоснование состава функций ЦУЗЗ.** Выполнение сформулированных требований обеспечивает защита, реализующая следующие функции:

1. Централизованная токовая защита относительного замера, основанная на сравнении:
  - среднеквадратичных значений полных токов  $3i_0$  для некомпенсированных сетей;
  - среднеквадратичных значений высших гармонических составляющих токов  $3i_0$  для компенсированных сетей.
2. Централизованная импульсная направленная защита, основанная на контроле начальных фазных соотношений электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.
3. Общая неселективная защита по напряжению  $3U_0$ .

**Выводы.** Разработано универсальное техническое решение в части централизованной защиты от ОЗЗ как для компенсированных, так и для некомпенсированных кабельных сетей 6-10 кВ. Испытания на имитационной модели подтвердили высокую селективность и устойчивость функционирования принятой архитектуры устройства.

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

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ ОБМОТКИ СТАТОРА**

Для синхронных генераторов мощностью более 30 МВт, работающих в блоке с трансформатором, требуется установка защиты от замыканий на землю, охватывающая всю обмотку статора. По принципу действия данные защиты можно разделить на два типа, основанных на:

- наложении на обмотку статора напряжения специальной формы;
- контроле напряжения третьей гармоники обмотки статора.

Многие защиты, основанные на контроле третьей гармоники подвержены ложной работе при изменении условий нагрузки, а также могут иметь недостаточную чувствительность в некоторых режимах работы генератора. Это обусловлено сильной зависимостью напряжения третьей гармоники от конструкции и режима работы генератора [1].

Разработка эффективной и надежной защиты на основе третьей гармоники и заключение о возможности её применения на конкретном типе генератора требует изучения поведения напряжения третьей гармоники во всех возможных режимах работы машины. Эффективным решением данной проблемы является имитационное моделирование в среде SIMULINK программного комплекса MATLAB.

Разработана модель турбогенератора для установившихся режимов, главной особенностью которой является учет основных конструктивных особенностей машины, а именно:

- отношение обмотанной и полной поверхностей ротора;
- укорочение шага и схемы соединения обмоток статора;
- насыщение магнитной цепи.

Модель производит расчет МДС ротора, МДС реакции статора и результирующего магнитного потока в воздушном зазоре машины с дискретностью 5 градусов на каждом шаге моделирования, что позволяет получить формы напряжений статора близкие к реальным и, таким образом, отразить поведение третьей гармоники.

### **Библиографический список**

1. **Fulczyk M.**, Mydlkowski R. Influence of Generator Load Conditions on 3rd-harmonic Voltages in Generator Stator Winding // IEEE Trans. on Energy Conversion. 2005. Vol. 20. №1.



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

## **ЗАЩИТА РОТОРА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ НАЛОЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ**

Из существующих типов защит от замыканий на землю в одной точке обмотки ротора генераторов наиболее перспективной считается защита на основе наложения прямоугольных импульсов напряжения низкой частоты [1]. Преимуществами защиты являются высокая устойчивость к влиянию переходных процессов в цепи возбуждения генератора, широкий диапазон и высокая точность измерения сопротивления изоляции. Несмотря на достаточно высокое техническое совершенство защиты данного типа актуальной является задача ее совершенствования, как в аспекте повышения стабильности и точности измерения сопротивления изоляции, так и расширения ее функциональных возможностей.

Защита содержит источник низкочастотных прямоугольных импульсов напряжения, которые накладываются на цепи возбуждения генератора через схему инъекции, обеспечивающую контроль параметров импульсов и защиту источника и цепи измерения микропроцессорного устройства РЗА (МПУ РЗА) от воздействия высокого напряжения возбуждения [2]. Конфигурация и параметры схемы инъекции во многом определяют свойства защиты, такие как контролируемый диапазон, точность и скорость измерения сопротивления изоляции, а также возможность реализации дополнительных функций, например, определение места замыкания и др.

Проведен анализ и сравнение различных схем инъекции с использованием как математического, так физического моделирования. Наилучшие результаты дала схема инъекции, отличающаяся от классической наличием двух шунтов, измеряющих токи утечки каждого из полюсов. Произведено макетирование защиты на основе МПУ РЗА «Сириус» производства АО «РАДИУС Автоматика» с реализацией дополнительных функций, а именно определения места замыкания, измерения напряжения возбуждения и сигнализации отрыва заземляющей щетки.

### **Библиографический список**

1. **Hartmann W.** Advanced Generator Ground Fault Protections in Pulp and Paper Mill Applications // Beckwith Electric Company: Florida, USA, 2016.
2. **Шнеерсон, Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007.

*Р.Д. Айсин, студ.;  
рук. Д.Ю. Вихарев, асс., Н.А. Родин, ст. препод.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЗА ПИТАЮЩИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ С УСТРОЙСТВОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Для выбора параметров срабатывания токовых защит необходимо оценить максимальный и минимальный токи, протекающие через защиту, при коротких замыканиях (КЗ) в расчётных точках. На величины указанных токов напрямую влияет положение регулятора устройств регулирования под нагрузкой (РПН) силовых трансформаторов питающих подстанций. Для демонстрации неоднозначного влияния положения регулятора устройства РПН рассмотрен случай трёхфазного КЗ за трансформатором с односторонним питанием. Ток КЗ за трансформатором вычисляется с помощью следующего выражения:

$$I_{\text{КЗ}}(n) = \frac{E_c \cdot \frac{U_{\text{Нном}}}{U_{\text{Вном}} + n \cdot \frac{\Delta}{100} \cdot U_{\text{Вном}}}}{x_c \cdot \left( \frac{U_{\text{Нном}}}{U_{\text{Вном}} + n \cdot \frac{\Delta}{100} \cdot U_{\text{Вном}}} \right)^2 + \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{Нном}}^2}{S_{\text{ном}}}},$$

где  $E_c$  – электродвижущая сила питающей системы;  $x_c$  – индуктивное сопротивление питающей системы;  $U_{\text{Вном}}$  – номинальное напряжение высшей обмотки трансформатора;  $U_{\text{Нном}}$  – номинальное напряжение низшей обмотки трансформатора;  $n$  – номер ступени регулирования;  $\Delta$  – величина ступени регулирования;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность трансформатора;  $u_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Зависимость величины тока КЗ от положения регулятора представлена на рис. 1. Из графика можно сделать вывод, что величины максимального и минимального токов КЗ в зависимости от положения регулятора определяются неоднозначно, что напрямую влияет на выбор параметров срабатывания устройств релейной защиты и автоматики.

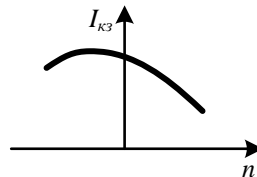


Рис. 1. Зависимость величины тока КЗ от положения регулятора устройства РПН

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

## АППРОКСИМАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ БЛОКА «ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР» ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

При расчете параметров срабатывания защиты блока «генератор-трансформатор» от однофазных замыканий на землю требуются значения межобмоточной ёмкости и ёмкости обмотки трансформатора на землю. Требуемые данные можно получить по графическим зависимостям [1], однако существуют такие проблемы, как ограниченный ряд мощностей трансформаторов, отсутствие информации о ёмкостях трансформаторов номинальным напряжением 500 кВ и присутствие в ряде источников выражений, не позволяющих адекватно рассчитать напряжение нулевой последовательности, наводимое в генераторной цепи при КЗ на землю в сети высшего напряжения.

В данной работе предлагается решение обозначенной методической проблемы путем аппроксимации графических зависимостей из [1]. Наиболее оптимальной стала функция следующего вида (рис. 1):

$$C_{0T} = \frac{\sqrt{S_{\text{ном Т}}}}{b}, \quad (1)$$

где  $C_{0T}$  – ёмкость одной фазы обмотки НН трансформатора;  $S_{\text{ном Т}}$  – номинальная мощность трансформатора;  $b$  – коэффициент, равный 1118.



Рис. 1 Исходная и аппроксимирующая зависимости

### Библиографический список

1. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып.5. Защита блоков генератор-трансформатор и генератор-автотрансформатор. – М.: Энергия, 1963.

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

## **ПОДГОТОВКА ПУБЛИЧНОЙ БАЗЫ РЕАЛЬНЫХ ОСЦИЛЛОГРАММ РАЗЛИЧНЫХ СОБЫТИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

**Актуальность.** Рост цифровизации энергосистемы привёл к увеличению объёма данных, требующих обработки. Для компаний, производящих устройства РЗА (релейной защиты и автоматики) и осуществляющих их наладку, встают вопросы анализа осциллограмм, поступающих от производства. Также в открытом доступе практически отсутствуют базы реальных осциллограмм различных событий, которые могут быть использованными для анализа событий или проверки работы алгоритмов РЗА. Поэтому вопрос подготовки доступной и максимально обширной базы является актуальным.

**Материалы и методы.** В работе приведён разбор шагов по сбору и обработке осциллограмм для их удобного дальнейшего использования. Для создания функций, осуществляющих данную предобработку, использовался язык программирования Python и среда программирования VS Code, с применением расширения Codeium (ИИ-агент). Осциллограммы были получены из рабочих баз или иных источников.

**Исследования.** Рассмотрены основные шаги по подготовке базы осциллограмм для осуществления дальнейших исследований в области машинного обучения, а именно:

1. Сбор уникальных осциллограмм. Была разработана функция, осуществляющая поиск всех файлов формата COMTRADE и «brs». Было найдено порядка 43 тысяч уникальных осциллограмм.

2. Деперсонализация осциллограмм. Для публичного использования, требуется удалить всю конфиденциальную информацию.

3. Унификация и нормализация осциллограмм. У разных производителей и/или на разных объектах могут сильно отличаться различные базовые параметры, и они требуют унификации и приведения к единому диапазону значений (нормализации).

5. Преобразование типа. Для дальнейшего использования файлы были преобразованы в более универсальный «csv» формат.

6. Разметка осциллограмм. Для дальнейшего использования в системах машинного обучения требуется произведение предварительной разметки. На данный момент вопрос решён для органа реле направления мощности (РНМ).

**Выводы.** Предложен метод сбора и обработки осциллограмм для дальнейшего публичного использования.

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

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНОМ АПВ В СЕТЯХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Передача электрической энергии на дальние расстояния осуществляется линиями электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН, 330 кВ и выше), зарядная мощность которых в ряде случаев компенсируется шунтирующими реакторами. Повторное включение заряженной линии будет сопровождаться интенсивным волновым процессом и часто приводит к опасным перенапряжениям в ЛЭП, а также усложняет процесс гашения заземляющей дуги [1].

Сложность включения линии в выбранный момент связана прежде всего с тем, что из-за необходимости формирования команды повторного включения с опережением, равным времени действия выключателя, требуется прецизионное предсказание кривой напряжения на контактах выключателя.

Предложенная в рамках данной работы имитационная модель сети 500 кВ в программном комплексе PSCAD (рис. 1) позволяет выбрать момент повторного включения с учетом характера переходного процесса, то есть вблизи минимума биений или вблизи точки перехода кривой напряжения на контактах выключателя через нуль.

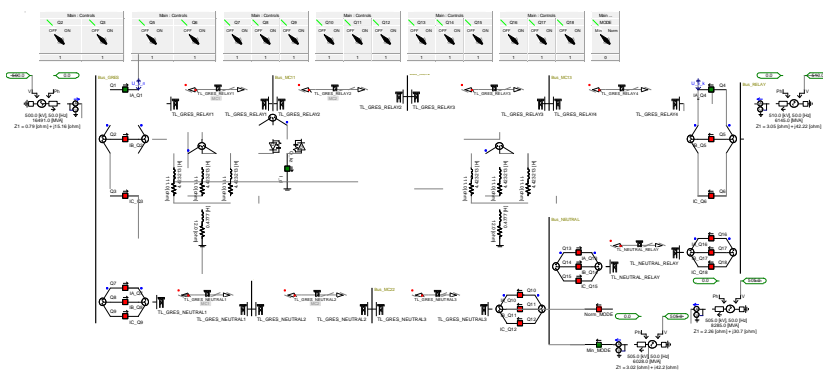


Рис. 1. Имитационная модель исследуемого участка сети

### Библиографический список

1. **Беляков, Н.Н.** Способ ограничения перенапряжений при повторных включениях линий электропередач/Н.Н. Беляков, В.С. Рашкец//Электричество, 1975. №2. — С. 22-28.

*К.В. Бабырь, асп.;*  
*рук. Д.А. Устинов, к.т.н., доц.*  
*(СПГУ, г. С.- Петербург)*

## **РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-10 КВ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Проведя сравнительный анализ электрических сетей напряжением 6-10 кВ наиболее частым повреждением, является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) [1]. Для обнаружения и устранения режима ОЗЗ необходимо применять современные, надежные и простые системы релейной защиты. В структуре алгоритмов защит от ОЗЗ в системе электроснабжения 6-10 кВ в качестве контрольного параметра используется ток нулевой последовательности  $3I_0$  [2]. Однако в режиме ОЗЗ кроме  $3I_0$  возникает ток обратной последовательности  $I_2$ . Отличительная особенность тока  $I_2$  состоит в том, что в режиме ОЗЗ ток  $I_2$  присутствует только на поврежденном отходящем присоединении. Таким образом, существует возможность в построении принципиально новых алгоритмов микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики от однофазных замыканий на землю.

Для анализа работы защит от ОЗЗ было выполнено имитационное моделирование в программном комплексе MatLab Simulink на участке распределительной сети 10 кВ АО «Шахта «Полосухинская». По итогам анализа полученных характеристик, можно утверждать, что ток  $3I_0$  в режиме ОЗЗ появляется на всех отходящих линиях, в то время как ток обратной последовательности формируется только на аварийном присоединении и носит постоянный характер, а значения тока  $I_2$  на всех неповрежденных линиях близко к нулю. Учитывая данную особенность формирования токов обратной последовательности в режиме ОЗЗ, существует возможность построения принципиально новых алгоритмов защиты, позволяющих повысить селективность и чувствительность действия микропроцессорных устройств РЗА.

Для повышения чувствительности действия защиты от однофазных замыканий на землю была разработана схема устройства защиты, основанного на измерении тока обратной последовательности. Применение в качестве рабочего сигнала тока  $I_2$ , в отличии от тока  $3I_0$ , позволяет выбрать уставку срабатывания на всех электрически связанных линиях единую, т.к. ток обратной последовательности имеет неизменную величину независимо на каком отходящем присоединении будет

формироваться режим ОЗЗ.

Выполним оценку эффективности действия предлагаемой защиты от ОЗЗ, фиксируя токи обратной последовательности, путем расчёта коэффициентов чувствительности для каждого из рассматриваемых способов защиты, результаты представлены на рис. 1. Уставка срабатывания защиты по току обратной последовательности –  $I_{с.з. min}$  выбирается исходя из вычислительных возможностей микропроцессорной системы релейной защиты и автоматики, а также с учетом небалансов, присутствующих в системе электроснабжения.

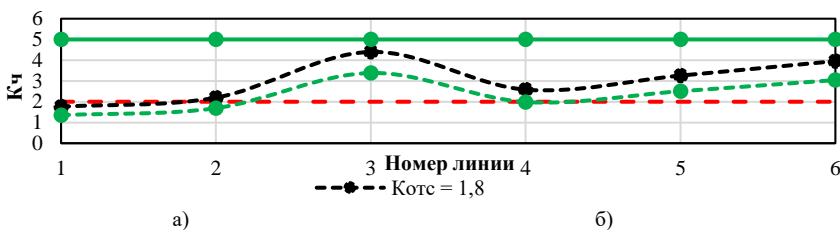


Рис. 1. Зависимости коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ при работе РЗА а) току нулевой последовательности; б) току обратной последовательности.

Аналитические исследования полученных результатов показывают, что применение устройства защиты от однофазных замыканий на землю, основанного на измерении тока обратной последовательности в электрических сетях среднего класса напряжения позволяет повысить чувствительность действия защиты от ОЗЗ, на всех отходящих присоединениях, в ходе чего удастся создать надёжную защиту, как при низких токах замыкания на землю, так и при дуговых перемежающихся ОЗЗ.

#### Библиографический список

1. **Матвеев, В.Н., Варнавский, К.А.** К вопросу о надежности электроснабжения угольных шахт Кузбасса. – Современные тенденции и инновации в науке и производстве. /Матвеев В.Н., Варнавский К.А. Материалы III Международной науч.-практ. конф., Филиал КузГТУ в г. Междуреченск, – Междуреченск, 2014, – 62-63 с.
2. **Смотров, Н.Н. и др.** Технические решения по предотвращению развития и ликвидации однофазных замыканий на землю в РУ 6–10 кВ электростанций. /Смотров Н.Н., Охлопков А.В., Полионов А.М., Битней В.Д. – Электричество, 2022, № 6, – 53-63 с. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-6-53-63

*М.В. Двойников, асп.;*  
*рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЁТА МЕЖДУФАЗНЫХ И ФАЗНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В УСТРОЙСТВАХ ЗАЩИТЫ СЕРИИ «СИРИУС»**

**Введение.** Для эффективного функционирования дистанционной защиты (ДЗ) от междуфазных КЗ и КЗ на землю важным является корректный расчёт векторов междуфазных и фазных сопротивлений. Современные устройства РЗА позволяют выполнить более точный расчёт с использованием различных алгоритмов обработки сигналов.

**Цель работы.** Создание модели алгоритма расчёта междуфазных и фазных сопротивлений устройств защиты серии «Сириус» для его дальнейшего исследования в составе ДЗ ЛЭП высокого напряжения.

**Метод исследований.** Для решения поставленной задачи выбран метод имитационного моделирования с использованием программного комплекса «MATLAB» («Simulink»). При верификации модели использовались устройство «Сириус-3ВЧ-04» и устройство «РЕТОМ».

**Моделирование алгоритма расчёта сопротивлений и его верификация.** Модель алгоритма и модель сети 220 кВ для его испытаний выполнены в соответствии с данными [1, 2] и информацией АО «РАДИУС Автоматика». Настройка алгоритма произведена по данным моделируемой сети [2].

Верификация модели проводилась на реальном устройстве защиты серии «Сириус» с функцией ДЗ путём подачи на него осциллограмм различных режимов в COMTRADE-формате от устройства «РЕТОМ», записанных с помощью модели сети в «MATLAB».

**Результат работы.** Подтверждена адекватность и достоверность созданной модели алгоритма расчёта векторов сопротивлений. Погрешности расчёта в различных режимах близки к нулю.

**Выводы.** По результатам работы возможно дальнейшее совершенствование алгоритма для работы в составе функции ДЗ устройств защиты серии «Сириус».

### **Библиографический список**

1. **Микропроцессорное** устройство защиты «Сириус-3ВЧ-04». Руководство по эксплуатации БПВА.656122.176. – М.: АО «РАДИУС Автоматика», 2023.
2. **Технические** требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – СТО 56947007-29.120.70.241-2017 (с изменениями от 11.12.2019). – ПАО «ФСК ЕЭС».



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

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ**

Искусственные нейронные сети (ИНС) получают все более широкое применение в защитах электроэнергетических систем для цифровой обработки сигналов и определения места повреждения (ОМП) [1 и др.]. Для решения вышеуказанных задач чаще всего используются многослойные ИНС прямого распространения, требующие создания специальной обучающей выборки данных, учитывающей возможный диапазон их изменения. В случае, когда диапазон варьирования входных параметров ИНС достаточно ограничен, сеть обучается лучше. При правильном обучении точность разработанных защит и ОМП на основе ИНС значительно повышается [2]. Поэтому при разработке способов и методов защит и ОМП на основе ИНС одной из наиболее важных задач является разработка модели защищаемого объекта, учитывающей все возможные влияющие на функционирование факторы. Современные программно-аппаратные средства (RTDS, Matlab, PSCAD и др.) позволяют создавать достаточно полные модели и автоматизировать процесс сбора обучающей выборки и тестирования ИНС. Обучение ИНС требует значительных вычислительных мощностей в основном из-за необходимости обработки большого объема данных обучающей выборки. В то же время полностью обученная нейронная сеть может обладать невысокой вычислительной нагрузкой, что позволит применить ее в современных микропроцессорных терминалах защиты и автоматики.

Отметим также, что устройства на основе ИНС могут обладать более высоким быстродействием и точностью, чем традиционные решения [2 и др.] благодаря учету сложных взаимосвязей между входными данными и применению быстродействующих методов цифровой обработки сигналов. Кроме того, при правильном обучении применение ИНС позволяет создавать адаптивные защиты и ОМП, способные правильно функционировать при изменяющихся режимах энергосистемы.

### **Библиографический список**

1. **Андреев, В.В.**, Славутский, Л.А., Славутская, Е.В. Обработка сигналов нейросетью прямого распространения: аппроксимация и принятие решений // Вестник ЧГУ. 2022. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-signalov-neyrosetyu-priyamoogo-rasprostraneniya-approksimatsiya-i-prinyatie-resheniy>.
2. **Табакон, И.А.**, Славутский, А.Л., Славутский, Л.А. Сравнительный анализ точности нейросетевого алгоритма при определении места повреждения по моменту начала и параметрам переходного процесса // Вестник ЧГУ. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-tochnosti-neyrosetevogo-algoritma-pri-opredelenii-mesta-povrezhdeniya-po-momentu-nachala-i-parametram>.

*В.И. Новиков, Д.А. Киселев, маг.;*  
*рук. С.О. Алексинский, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ СИММЕТРИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТРЁХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ В ОДНОФАЗНУЮ**

В существующих электрических трёхфазных сетях 115-230 кВ питающих тяговых подстанций железных дорог переменного тока с однофазными нагрузками возникает существенная несимметрия. Кроме того, регулируемая однофазная нагрузка (электровоз) управляется полупроводниковыми ключами, что вызывает гармонические и интергармонические высокочастотные колебания в токе и напряжении.

В ряде схем преобразователей неравномерное распределение нагрузок по фазам со стороны источника питания приводит к несимметрии, также искажение токов и напряжений из-за передачи гармоник снижает качество электроэнергии в системе. Проблема несимметрии важна особенно в электроэнергетических системах с малой мощностью короткого замыкания.

Исследуется двухтрансформаторный симметрирующий преобразователь трёхфазной системы в однофазную (ООО «Синглтон»). Цель: проверка соотношения расчётных параметров преобразователя. Сформирована модель преобразователя в среде Matlab Simulink и проведен ряд исследований подтверждающих симметричное распределения токов, мощностей со стороны источника питания.

Для предотвращения передачи из нагрузки в питающую сеть высокочастотных составляющих также было предложено в выходной цепи включить гаситель, который отбирает только мощности высокочастотных составляющих. Фильтрующие мощности могут быть использованы, например, для охлаждения собственного устройства. В модели исследованы высшие гармоники нагрузки регулируемой тиристором в зависимости от угла открывания. Сформулированы требования к фильтрующего узла гасителя.

Исследования модели показали работоспособность принципа двухтрансформаторного преобразователя, эффективность гасителя высокочастотных составляющих тока нагрузки.

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

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТА НАСЫЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ ЦЕПИ НАМАГНИЧИВАНИЯ**

Насыщение электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) является серьезной проблемой для устройств релейной защиты и автоматики. Это явление обусловлено нелинейностью материала, из которого изготавливается магнитопровод ТТ. Насыщение магнитопровода может привести к ложным действиям устройств продольной дифференциальной токовой защиты (ДЗТ) из-за искажения вторичных токов трансформаторов тока при внешних повреждениях.

Определение факта насыщения ТТ позволяет реализовать различные способы повышения устойчивости функционирования устройств, реализующих функции ДЗТ: восстановление формы кривой приведенного первичного тока во время насыщения, блокировку действия защиты в случае внешнего повреждения и насыщения хотя бы одного ТТ в плечах ДЗТ. Для определения факта насыщения предлагается использовать метод непрерывного измерения параметров цепи намагничивания ТТ в процессе его функционирования. Такое измерение возможно реализовать путем включения во вторичную цепь ТТ источника синусоидальной электро-движущей силы высокой частоты (ЭДС). Значения амплитуд высокочастотной составляющей вторичного тока и ЭДС полностью определяют электрическое сопротивление ветви намагничивания. При насыщении это сопротивление уменьшается до некоторого значения, определяющегося геометрическими параметрами первичной и вторичной обмоток [1]. Таким образом, непрерывное измерение сопротивления цепи намагничивания позволяет определить факт насыщения трансформатора тока.

### **Библиографический список**

1. **Вихарев, Д. Ю.** Экспериментальное определение индуктивности цепи намагничивания электромагнитного трансформатора при насыщении магнитопровода / Д. Ю. Вихарев, Н. А. Родин // Состояние и перспективы развития электро - и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом, Иваново, 31 мая –02 июня 2023 года. Том III. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. – С. 397-404.

*М.В. Двойников, асп.; С.Л. Дербенев, студ.;  
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**Введение.** Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на выбор уставок срабатывания резервных ступеней дистанционных защит (ДЗ) ЛЭП 110-220 кВ, являются параметры режима самозапуска электродвигательной нагрузки защищаемой линии: коэффициент самозапуска  $K_{зап}$  и угол  $\varphi_{зап}$ . Достаточно точное определение параметров  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  возможно только при применении специальных расчетных программ режимов самозапуска, поэтому при выборе уставок резервных ступеней ДЗ наиболее часто применяются приближенные методы расчета  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  [например, 1, 2 и др.]. С учетом этого актуальной задачей является оценка точности приближенных методов определения параметров режима самозапуска и области их применения.

**Цель работы** – анализ точности упрощенных методов расчета параметров режима самозапуска двигательной нагрузки ЛЭП, предложенных ЮРГПУ (НПИ) [1] и СО «ФСК ЕЭС» [2]. Первый из указанных методов позволяет определить  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  при заданной доле двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки ЛЭП, второй метод – угол  $\varphi_{зап}$  при известном значении  $K_{зап}$ .

**Метод исследований.** Для решения поставленной задачи использовалось имитационное моделирование с применением программного комплекса «MATLAB» («Simulink»).

**Результаты исследований.** Разработана имитационная модель участка электрической сети 110-220 кВ для исследований параметров режима самозапуска двигательной нагрузки ЛЭП. На основе исследований на имитационной модели получены оценки погрешностей приближенных методов расчета параметров  $K_{зап}$  и  $\varphi_{зап}$  на основе рекомендаций [1 и 2], условий и области их применения.

### **Библиографический список**

1. **Нагай, В.И.** Повышение технического совершенства релейной защиты распределительных сетей 6-110 кВ электроэнергетических сетей: Дис. доктор. техн. наук 05.14.02 /В.И. Нагай. – Новочеркасск, 2002. – 483 с.
2. **Методические указания** по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кВ и выше (утверждены распоряжением АО «СО ЕЭС» №89р от 17.08.2021).

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

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

В современной электроэнергетике актуальной является разработка интегрированных систем интеллектуальной энергетики, подтвержденная планом Национальной технологической инициативы и Энергетической стратегией до 2035 года [1]. Существующий уровень автоматизации электроэнергетических систем обеспечивает их надёжную работу, однако требуется совершенствование релейной защиты и автоматики (РЗА) для улучшения функциональности.

Переход элементной базы к микропроцессорным (МП) терминалам обеспечил компактность и более высокий уровень функциональности систем РЗА. Однако отказы МП устройств могут быть вызваны перенапряжениями, ошибками в программном обеспечении, сбоями в питании и кибератаками. Человеческий фактор, ошибки в конфигурации элементной базы также ведут к увеличению процента отказов в системах РЗА при переходе к более современным технологиям [2, 3].

В области интеллектуальной релейной защиты (ИРЗ) наблюдается повышение адаптации алгоритмов к изменениям режимов электрических сетей, использование сетевых технологий для синхронизации передаваемой информации в реальном времени, внедрение стандарта МЭК 61850 и применение современных методов обработки сигналов [4].

Для этого требуется оборудование всех элементов сети интеллектуальным электронным оборудованием для передачи и обработки данных. Использование искусственного интеллекта, нейронных сетей, облачных вычислений, Wi-Fi и Big Data, позволяет адаптировать релейную защиту к изменениям в электросетях, автоматически корректировать параметры срабатывания и уменьшить влияние человеческого фактора.

### **Библиографический список**

1. **Национальная** технологическая инициатива. Энерджинет [Электронный ресурс] // Национальная технологическая инициатива: [Официальный сайт], 2016. URL: <http://www.nti2035.ru/markets/energynet> (дата обращения: 15.11.2023).
2. **Гуревич, В. И.** Микропроцессорные реле защиты: устройство, проблемы, перспективы / В. И. Гуревич. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2011. – 336 с.
3. **Папков, Б. В.** Киберугрозы и кибератаки в электроэнергетике: учеб. пособие / Б. В. Папков, А. Л. Куликов, В. Л. Осокин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017. – 78 с.
4. **Лачугин, В.Ф.** и др. Design Concept of Power System Intelligent Relay Protection (Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей) / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Куликов А.Л., Обалин М.Д. // Известия российской академии наук, Энергетика, 2015. № 4. – С. 28–37.

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

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕКТОРНОГО ПОТЕНЦИАЛА МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Для расчетов установившихся и переходных режимов энергосистем возникает задача построения достоверных моделей кабельных линий. Основными трудностями моделирования участков кабельных линий являются сложное геометрическое расположение и количество токопроводящих элементов, их транспозиция, а также заземление экранов кабельных линий. Современные программные комплексы не содержат универсального решения по определению удельных параметров кабельных линий электропередачи. В связи с этим актуальной является задача разработки универсальной математической модели кабельной линии.

Математическая модель какого-либо электротехнического устройства должна содержать в себе описание магнитного и электрического полей. В [1] показано, что построение цепной модели проводников сложной формы возможно с помощью применения векторного потенциала магнитного поля. Использование этой физической величины позволяет значительно упростить формулировку всех выражений, необходимых для построения математической модели.

Применительно к кабельной линии векторный потенциал магнитного поля позволяет определить собственные и взаимные индуктивности всех элементов кабельной линии (токопроводящие жилы, экраны, защитные элементы) с учетом всех геометрических форм проводников. С помощью этой физической величины также возможно определить характер токов, протекающих по экрану в случае наличия нескольких точек электрической связи экрана с землей. Такое детальное описание экрана как объемного проводника сложной формы позволяет получить модель кабельной линии при коротких замыканиях «жила-экран» в случае различных способов заземления экрана.

### **Библиографический список**

1. **Вихарев, Д. Ю.** Аналитический расчет индуктивностей рассеяния на основе применения векторного потенциала магнитного поля / Д. Ю. Вихарев, И. С. Снитыко, А. И. Тихонов // Моделирование систем и процессов, 2021. Т. 14, № 1. – С. 4-10. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-1-4-10. – EDN POECVY.

**СЕКЦИЯ 16**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

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

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

*А.П.С. Серуков, студ.:  
рук. А.Н. Голубев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ**

Индукционная закалка является в настоящее время одним из основных и наиболее эффективных способов упрочнения поверхностных слоев деталей машин. Несмотря на длительную практику её применения, возможности её совершенствования далеко не исчерпаны. Это касается, в первую очередь, создания новых типов источников питания установок индукционной закалки, в качестве которых во многих случаях до сих пор используются электромашинные генераторы. Кроме того, большие резервы повышения эффективности этого метода заключаются в возможности совершенствования конструкций индукторов и оптимизации собственно режимов закалки. Последнее становится особенно актуальным в связи с постоянно повышающимися требованиями к усталостной прочности и твердости закаливаемых изделий.

Существующие методы проектирования установок индукционной закалки, и в частности её основных элементов – индукторов, обычно основаны на применении грубых приближенных методик, опирающихся на экспериментальные данные. Поскольку на самом деле зависимости между термическими и энергетическими параметрами технологического процесса не выражаются в простой форме, такой подход не позволяет получить оптимальные параметры конструкций индукторов и режимов закалки.

В данной работе будет предложена методика расчета индукторов и режимов индукционной закалки дорожек качения опорно-поворотных устройств (ОПУ) автомобильных кранов. Проведется разработка алгоритма расчета предварительного значения тока индуктора для требуемых параметров индукционной закалки. В последствии будет приведена методика совместного расчета электромагнитного и теплового полей. Моделирование электромагнитного и теплового полей будет произведено с использованием программного комплекса ElCut.

### **Библиографический список**

- 1. Установки** индукционного нагрева: учебное пособие для вузов/ А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; //Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.
- 2. Слухоцкий, А.Е., Рыскин, С.Е.** Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 263 с.



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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ**

В настоящее время индукционный нагрев является прогрессивной электротехнологией и применяется в промышленности при осуществлении различных технологических процессов, связанных с тепловой обработкой изделий из металлов [1]. Одним из направлений использования индукционного нагрева является стыковая сварка, применяющаяся, например, для получения неразъёмных соединений отдельных частей трубопроводов различного назначения. Существующие методы реализации индукционной стыковой сварки основаны на использовании цилиндрических внешних индукторов, обеспечивающих выделение греющей мощности в поверхностных слоях околшовной зоны соединяемых объектов. При этом высокая эффективность процесса возможна лишь при детальной проработке технологии, включающей в себя выбор конструкции индуктора и режима работы источника питания, позволяющих получить равномерное распределение температурного поля на торцах соединяемых деталей.

Работа посвящена исследованию электротепловых процессов индукционного нагрева свариваемых кромок стальных труб при их стыковой сварке. В основе модели лежит совместное решение уравнения электромагнитного поля и дифференциального уравнения теплопроводности, что позволяет определять пространственное распределение плотности тока, тепловыделения и температурного поля в расчётной области при учёте нелинейно изменяющихся физических свойств моделируемых объектов (удельная электрическая проводимость, магнитная проницаемость, теплопроводность, плотность, теплоёмкость). Полученные данные могут быть использованы для анализа при оптимизации процесса нагрева, посредством варьирования входных параметров модели (величина тока в индукторе, его частота, время нагрева), а также для расчёта энергетических характеристик (потребляемая мощность и электрический КПД), которые должны приниматься во внимание при выборе конструкции индуктора и режима работы индукционной установки.

### **Библиографический список**

1. **Современные** энергосберегающие электротехнологии: учеб. пособие для вузов / Ю.И. Блинов [и др.] – СПб: СПбГТЭУ «ЛЭТИ», 2000. – 564 с.

*Шамров Д.Д., студ.;  
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ЭЛУ-21**

Для повышения эффективности использования электронно-лучевой сварки необходимо обеспечить высокую степень вакуума до  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  мм. рт. ст. внутри объёма технологической камеры.

Решение этой задачи возможно при использовании магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) [1]. Предлагается использовать конструкцию модульного типа, в которой обеспечивается постоянство рабочего зазора по всей его длине. Магнитопровод МЖГ имеет классическую форму.

По результатам проектного расчёта найдена геометрия рабочей области герметизатора. Диаметр герметизируемого вала  $d=30$  мм, шаг зубца  $b=2$  мм и величина площадки при основании  $t=0,2$  мм. Зубец имел форму прямоугольной трапеции с углом при основании  $\alpha=45^{\circ}$ . Величина рабочего зазора  $\delta=0,15$  мм. Скорость вращения вала до 1 м/с. Численные исследования проводились в программной среде FEMM.

В качестве источника магнитного поля в МЖГ применялись «закритические» магниты. Параметры постоянных магнитов в ходе численных исследований были приняты следующими: Величина коэрцитивной силы составляла  $H_c=640$  кА/м, а остаточной индукции  $B_r=0,9$  Тл. Для материала магнитопровода МЖГ была выбрана сталь марки – Сталь 20, с индукцией магнитного насыщения  $B_s=2,166$  Тл в поле  $H_c=50$  кА/м.

В результате численных расчётов получена картина распределения магнитной индукции в рабочем зазоре МЖГ. Диапазон изменения величины максимальной магнитной индукции в рабочем зазоре составил  $B_{max}=1,13\div 1,15$  Тл.

В ходе исследований изменялась и температура в технологической камере от 20 до 100 $^{\circ}$ С. Результаты расчёта показали сохранение требуемых эксплуатационных параметров МЖГ при герметизации вращающегося вала технологической камеры установки ЭЛУ-21.

### **Библиографический список**

1. **Сайкин, М.С.** Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования: монография. – 2-е изд., стер. – СПб.: «Лань», 2023. – 136 с.: ил.

*Ю.В. Яцына, студ.;*  
*рук. В.С. Баженов, ст. препод.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ УЗЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ КОНТАКТНО-СТЫКОВОЙ СВАРКИ**

Контактно-стыковая сварка в настоящее время является одним из основных и наиболее эффективных способов для изготовления таких ответственных изделий и узлов энергетического оборудования атомной энергетики, как тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ). Особые требования, предъявляемые при изготовлении ТВЭЛ, делают одним из наиболее актуальных вопросов расчета узлов оборудования контактно-стыковой сварки – сварочного вторичного контура и электромагнитного привода сжатия.

Расчет сварочного вторичного контура включает в себя определение активного  $R$  и индуктивного  $X$  сопротивлений. Знание этих параметров позволяет рассчитать или подобрать наиболее эффективный сварочный трансформатор. Определение  $R$  и  $X$  производится только после уточнения геометрических размеров вторичного контура, сообразуясь с габаритами детали, предназначенной для сварки в этом контуре, и выбора сечения всех его элементов по заданному длительному вторичному номинальному току и способу их охлаждения (допустимой плотности тока). Во вторичном контуре контактных машин теряется до 40 % установочной мощности, поэтому при проектировании необходимо уменьшить не только длину элементов контура, их число, но и площадь, охватываемую контуром, и число сочленений. Сечения всех элементов контура, система охлаждения, площадь сочленения друг с другом должны быть такими, чтобы при протекании номинального длительного вторичного тока температура элементов контура не превышала 80 °С.

Применение электромагнитного привода сжатия (ЭПС) в последнее время находят всё большее распространение, так как лишены всех недостатков, присущих пневматическому приводу. Среди всего разнообразия для контактных машин наиболее приемлемы ЭПС постоянного тока с втягивающимся якорем. Для предотвращения ударного воздействия в конце хода якоря для контактных машин используют два приёма: либо разрезают якорь на две неравные части с регулируемым зазором между ними, либо применяют две катушки - одну для страгивания и передвижения якоря, другую, силовую - для сжатия деталей. В результате силовая характеристика ЭПС практически не зависит от хода якоря.

В данной работе предложена методика расчета сварочного вторичного контура и электромагнитного привода сжатия установки контактно-стыковой сварки заглушек ТВЭЛ. Проведена разработка алгоритма расчета требуемых параметров в соответствии с исходными данными.

### **Библиографический список**

1. **Климов, А.С.** и др. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки: учебн. пос. /Климов А.С., Смирнов И.В., Кудинов А.К. и др. - 3-е изд., испр. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 336 с.
2. **Банов, М. Д.** Технология и оборудование контактной сварки. Учебн. / М. Д. Банов. – 3-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 224 с.

*Д. С. Смирнов, студ.;*  
*рук. В. Д. Карачёв, ст. препод.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ**

В настоящее время аргонодуговая сварка является одним из основных и наиболее качественных способов соединения металлов. Её применяют везде, где к сварочным швам предъявляются повышенные требования. Данный способ сварки позволяет соединять любые стали, а также цветные сплавы. Однако, несмотря на длительную практику её применения, она не совершенна. Это касается и источников питания, применяемых для аргонодуговой сварки. Во всех мощных источниках питания следует применять корректор коэффициента мощности, для активной фильтрации тока сети.

В источниках питания без корректора коэффициента мощности ток содержит набор гармонических составляющих, которые отрицательно влияют на проводку электросети и электроприборы, подключенные к ней. Источник питания, имеющий коррекцию коэффициента мощности, потребляет ток с малыми гармоническими искажениями, равномернее отбирает мощность от сети, имеет коэффициент амплитуды ниже, чем у некорректированного источника. Коррекция коэффициента мощности снижает среднеквадратическое значение потребляемого тока, что позволяет подключать к одному выводу электросети больше разных устройств, не создавая в ней перегрузок по току.

В данной работе будет смоделирован корректор коэффициента мощности источника питания для аргонодуговой сварки. Проведется разработка алгоритма расчета требуемых параметров для моделирования корректора коэффициента мощности.

### **Библиографический список**

1. **Милютин, В.С., Матушкин, А.В.** Источники питания для сварки: учеб-метод. пос., М-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та, 2023. – С. 89.
2. **Королёв, А.Н., Петрунин, В.В.** Технология электродуговой сварки: учеб-метод. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 56 с.

**Н.М. Петухов, студ.;**  
**рук. А.Е Храмов, асс.**  
**(НГТУ, г. Н. Новгород)**

## РАЗРАБОТКА АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Для преобразования переменного напряжения в постоянное обычно применяются неуправляемые однофазные или трёхфазные выпрямители с ёмкостным фильтром на выходе. Однако такие устройства потребляют из питающей сети импульсный ток, что приводит к существенному искажению питающего напряжения [1].

Уменьшить негативное воздействие таких преобразователей на сеть можно за счёт установки внешнего оборудования, или применяя устройства пассивной или активной коррекции.

В основе разрабатываемого активного корректора коэффициента мощности (ККМ) лежит обратногоходовой повышающий широтно-импульсный преобразователь, двухконтурная микропроцессорная система управления которого построена с подчинённым принципом регулирования [2]. Функциональная схема ККМ представлена на рис. 1.

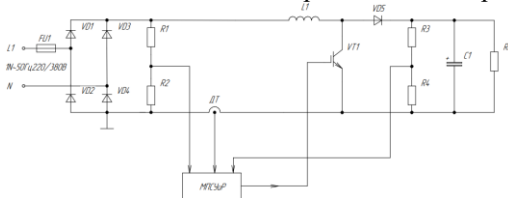


Рис. 1. Функциональная схема активного корректора коэффициента мощности

Для анализа режимов работы активного корректора с синхронным и асинхронным алгоритмами управления разработаны имитационные модели в ПО *MatLab* и *MicroCap*. Имитационное моделирование позволило перейти к следующим этапам – к разработке программы управления и регулирования для микроконтроллера, к изготовлению макета и к экспериментальным исследованиям.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема №FSWE-2022-0006).

### Библиографический список

1. **Ваняев, В.В.** Преобразовательная техника: учеб. пособие / В.В. Ваняев; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2020. – 135 с.
2. **Герман-Галкин, С.Г.** Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде *Matlab-Simulink* / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: Лань, 2013. – 448 с. – ISBN 978-5-8114-1520-5.

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

## **РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ СВАРОЧНОГО ИНВЕРТОРА**

Сварочные инверторы играют ключевую роль в современной промышленности и домашнем использовании. Это электронное устройство, которое преобразует электрический ток из источника переменного тока (чаще всего сетевого напряжения) в постоянный ток нужного номинала.

В связи с существующим недостатком, а именно, перегревом при интенсивном использовании и отсутствии контроля за температурой инверторного модуля, устройство сварочного инвертора очень быстро выходит из строя. Для того чтобы сварочный инвертор сохранял свои свойства на протяжении долгого времени, его температура должна поддерживаться в определенном диапазоне от 0 до +120 °С. Поэтому целью управления данной установкой является осуществление контроля за температурой и охлаждение сварочного инвертора. Одной из важных задач разработки микропроцессорного управления установки охлаждения является рациональное размещение датчика температуры в сварочном инверторе. Контроль температуры сварочного инвертора необходим для обеспечения безопасной, производительной и качественной работы оборудования, а также для сохранения его работоспособности на долгосрочной основе.

В докладе рассмотрены материалы по разработке системы контроля охлаждения сварочного инвертора, его общая конструкция и способ управления охлаждением, проведена разработка микроконтроллерной системы управления данным устройством охлаждения. Составлены блок-схемы и направленный граф алгоритма управления системой охлаждения сварочного инвертора, разработано на языке программирования Ассемблер программное обеспечение и в программном продукте PROTEUS составлена электронная схема работы сварочного инвертора. Материал исследования представлен в квалификационной работе.

### **Библиографический список**

1. **Назаров, В.И., Рыженко, В.И.** Сварочный инвертор теория и практика. / Назаров В.И., Рыженко В.И. – М.: Оникс, 2008. – 40 с.
2. **Правила** устройств электроустановок. Все действующие разделы 6 и 7-изд. с изм. и доп. по состоянию на 1 февраля 2015 г. – М.: КНОРУС – 488 с.

**А.А. Чугров, студ.;**  
**рук. А.Е. Храмов, асс.**  
**(НГТУ, г. Н. Новгород)**

## **РАЗРАБОТКА ОДНОФАЗНОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

В настоящее время в промышленности для улучшения электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с питающей сетью, кроме пассивных корректоров, начинают внедряться устройства с активной коррекцией коэффициента мощности. В преобразователях, работающих от однофазной сети, применяется схема активной коррекции на основе повышающего широтно-импульсного преобразователя, построенного на одном транзисторе. С таким активным корректором коэффициент мощности преобразователя близок к единице.

Большие функциональные возможности имеет активный выпрямитель, построенный на четырёх транзисторах. Такой преобразователь может работать с любым коэффициентом мощности (опережающим и отстающим) как в режиме выпрямления, так и при рекуперации, что дает дополнительные преимущества данному преобразователю в случае наличия противо-ЭДС в нагрузке [1, с. 179].

Для анализа режимов работы активного выпрямителя с двухполярной и однополярной широтно-импульсной модуляцией разработаны имитационные модели с использованием двух программных сред: *MatLab* и *MicroCap* [2]. Исследования в программном обеспечении *MicroCap* позволили учесть реальные параметры полупроводниковых элементов и получить уточненные энергетические характеристики разрабатываемого преобразователя. В настоящее время монтируется макет, разрабатывается программа для микроконтроллера системы управления и регулирования.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема №FSWE-2022-0006).

### **Библиографический список**

1. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
2. **Герман-Галкин, С.Г.** Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде *Matlab-Simulink*: учебник / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: изд-во «Лань», 2013. – 448 с.

*М.И. Чернышов, студ.;*  
*рук. Г.В. Чекан, к.т.н.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Рассмотрена специализированная электротехнологическая установка для нагрева металла на базе индукционной тигельной печи. В виду относительной простоты ее конструкции, существенное влияние на уровень надежности данной установки оказывает система внешнего электроснабжения.

Оценить параметры безотказности системы электроснабжения можно используя модифицированный топологический метод, основанный на теории графов [1-2]. Этот подход реализован в специализированном программном продукте [3] и позволяет полностью автоматизировать как процесс создания математической модели (направленного графа переходов и состояний), так и сам расчет.

Важной частью данной задачи является подбор объективных параметров для потоков отказов и восстановлений отдельных компонентов системы электроснабжения. Наиболее актуальные сведения, представленные в [4], позволяют осуществить инженерный расчет.

В качестве основных показателей надежности выбраны вероятность безотказной работы и среднее время наработки до первого отказа, которые позволяют объективно прогнозировать работу рассмотренной электротехнологической установки.

### Библиографический список

1. **Половко, А.М., Гуров, С.В.** Основы теории надежности. 2-е изд., перераб. и доп.-СПб: БХВ, – С.-Петербург, 2006. – 704 с.
2. **Чекан, Г.В.** Развитие топологического метода для комплексного подхода к определению показателей надежности технических систем // Вестник ИГЭУ / Иванов. гос. энергетич. ун-т. – Иваново, 2014. Вып. 5. – С. 51-57.
3. **Чекан, Г.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: DORI\_CL - PROFESSIONAL EDITION № 2019611932. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7 февраля 2019 г.
4. **Назарычев, А.Н.** Надёжность и оценка технического состояния оборудования систем электроснабжения: учеб. пособ. / А.Н. Назарычев, Д.С. Крупенёв. – Новосибирск: Наука, 2020. – 224 с.



*С. В. Подунай, студ.;*  
*рук. А. Е. Савенко, к.т.н., доц.*  
*(КГМТУ, г. Керчь)*

## **АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ В КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМАХ**

Возникающие колебания при перемещении груза приносят массу неблагоприятных последствий: от повреждения самого груза до небезопасности работающего персонала. Полностью исключить их невозможно, но свести эти колебания к минимуму достаточно актуальная тема для промышленных предприятий и в других областях, где активную роль играет перемещение грузов в подвешенном состоянии.

Автоматическая система гашения колебаний груза с использованием датчиков движения представляет собой замкнутую систему с обратной связью. Используется встроенная сверху над грузом камера, прикрепленная к тележке, например, мостового крана. Камера фиксирует изменение отклонения крюков или других средств захвата груза от их нормальной оси. Над средством захвата находится отражатель, который должен находиться в зоне допустимого значения отклонения от оси. Как только колебания выходят из зоны допустимого камера фиксирует это и передает данные на компьютер со специальным программным обеспечением. После обработки данных, от компьютера на ПЛК приходит сигнал корректировки скорости движения, чтобы уменьшить раскачивание груза [1].

Сигнал с камер на средство мониторинга можно передавать с помощью беспроводных технологий, что уменьшает затраты на установку проводного соединения между средством наблюдения и компьютером. Такая система управления позволяет сократить время работы, повысить точность позиционирования груза и снизить утомляемость оператора и риск несчастных случаев.

В программное обеспечение так же может входить нейросеть для быстроты реагирования и регулирования. Нейросеть предназначена для настройки параметров контроллера в режиме онлайн [2].

### **Библиографический список**

1. **SmartCrane™** Anti-Sway Crane Control: Product Descriptions // SmartCrane, LLC, USA, 2010.
2. **Tang, W.,** Ma, R., Wang, W. et al. Adaptive PID control of overhead cranes based on ISOA–NN. Int. J. Dynam. Control (2024).

*С.В. Пантелеев; А.Б. Менжинский; А.Н. Малашин  
(ВАРБ, г. Минск)*

## **МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ ЭДС**

Решение задачи использования энергии высших гармоник индукции магнитного поля в процессе электромеханического преобразования энергии для улучшения энергетических показателей многофазного синхронного генератора с дробными зубцовыми обмотками актуально.

Новизной методики является использование векторного критерия оптимальности, компонентами которого являются: 1) сумма обмоточных коэффициентов по пространственным гармоникам первого и третьего порядка; 2) коэффициент искажения формы индукции магнитного поля возбуждения; 3) удельная масса генератора. Последовательность решения задачи оптимизации генератора следующая. В целях увеличения действующего значения полигармонической ЭДС в обмотке определяются рациональные соотношения количества зубцов статора и полюсов ротора генератора, обеспечивающих максимум первого критерия с учетом заданного ограничения на коэффициент дифференциального рассеяния. Обеспечение наибольшей доли пространственных гармоник первого и третьего порядка в распределении индукции магнитного поля возбуждения исследуемого генератора выполняется путем поиска рациональных соотношений величины полюсного перекрытия и относительного открытия пазов статора. Таким образом, принимая дополнительные ограничения на каждом следующем этапе методики, векторный критерий сводится к скалярному – удельной массе генератора. Посредством электромагнитного расчета генератора выполняется анализ чувствительности критерия оптимизации «удельная масса» к изменению параметров электромагнитной системы генератора, а также формируется область исходных данных для решения задачи оптимизации. Установлено, что минимум удельной массы генератора целесообразно достигать путем поиска методом сканирования с ограничениями значений переменных: высоты постоянного магнита и числа витков обмотки. На завершающих этапах методики посредством численной модели генератора уточняются геометрические параметры магнитной системы и номинальные параметры генератора, соответственно.

Применение разработанной методики оптимального проектирования для девятифазных синхронных генераторов с дробными зубцовыми обмотками обеспечивает уменьшение их удельной массы на 20–23 % при сохранении КПД относительно трехфазных аналогов в мощностном диапазоне 500 – 6500 Вт.

**Бармина А.И., маг.;**  
**(УТУ, Ульяновск)**

## **АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ**

Хорошие токоограничивающие свойства, возможность многократно само восстанавливаться и осуществить цикл автоматического повторного включения (АПВ) – бесспорные преимущества жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) перед обычными плавкими предохранителями. Кроме того, жидкий металл в капиллярном канале диэлектрической втулки герметизирован от воздуха и не подвергается воздействию окружающей среды. Окисление плавкой вставки ЖСП в принципе невозможно даже при температуре предельно близкой к температуре кипения металла. Это обстоятельство позволяет приблизить номинальный ток ЖСП к пограничному и увеличить срок службы ЖСП до 30 лет [1]. Уменьшение соотношения пограничного тока к номинальному до 1,1 позволяет ЖСП осуществлять защиту от перегрузок небольшой кратности, что невозможно для обычных предохранителей, для которых указанное соотношение составляет 1,3–2, а срок службы 16 000 часов. На сегодняшний день, уровень исследований жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) как в Российской Федерации, так и за рубежом не позволяет разработать промышленные образцы. Такие исследования проводятся отдельными инициативными группами в разных странах мира [1-3].

Обзор литературы по проблеме разработке ЖСП позволяет выделить две основные группы этих устройств. К первой группе относятся ЖСП с управляемым временем восстановления. После отключения аварийного тока они могут быть подготовлены к повторному действию при изменении своего положения в пространстве и т.д. Эти предохранители не нуждаются в замене, но для их восстановления в исходное состояние необходимо внешнее воздействие со стороны оперативного персонала или автоматического устройства. Ко второй группе относятся ЖСП с неуправляемым временем восстановления. Их восстановление в исходное состояние происходит сразу после конденсации паров жидкого металла. Такие ЖСП иногда называют жидкометаллическими ограничителями тока.

### **Библиографический список**

1. **Кузнецов, А.В.** Жидкометаллические предохранители и инвестиционная привлекательность их разработки. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 207с.
2. **Niayesh K., Tepper J., König F.** A Novel current limitation principle based on application of liquid metals // IEEE transaction on components and packaging technologies. 2006, vol 29, №2 P. 303-309.
3. **T. Itoh, T. Miyamoto, Y. Wada, T. Mori, and H. Sasao,** “Design considerations on the P. P. F. For a control center,” IEEE Trans. PowerApp. Syst., vol. PA-92, no. 4, pp. 1292–1297, Jul. 1973.

*Д.Д. Давыдова, студ.;*  
*рук. А. Е. Савенко, доц.*  
*(КГМТУ, г. Керчь)*

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Преобразование энергии морских волн перешло на новый уровень. Созданы волновые электростанции, которые поглощают и вырабатывают энергию для дальнейшего использования. Керченский пролив является одним из лучших мест для постройки преобразователей, так как потенциал волн в этих местах огромен, часто подвергается надвигающимся циклонам, а так же более других доступен, что облегчает обслуживание. Лучше устанавливать базы типа «Pelamis», потому что они будут использоваться еще в качестве волнорезов, что в свою очередь предпочтительнее для берегов Крыма.

Электростанция типа «Pelamis» состоит из четырех последовательно соединенных полузатопленных конвертеров, связанных между собой шарнирами с гидравлическими поршнями. Мощность одной секции составляет 750 кВт. По своей конструкции это очень сложная, замкнутая гидросистема, в каждом конвертере которой есть три модуля, преобразующие энергию. Гидравлические двигатели перекачивают масло и вызывают вращение генератора, который вырабатывает электроэнергию.



Рис.1. Главные составляющие электростанции «Pelamis»

В целях получения более качественных выходных показателей, данные станции лучше строить ближе к берегу, где волны будут сильнее, профили мягче, а движение воды стабильно. «Pelamis» станет толчком для продвижения получения электроэнергии с помощью возобновляемых источников энергии в Черном море.

### Библиографический список

1. Волшаник В.В., Матушевский Г.В. Энергия морских ветровых волн и принципы ее преобразования // Гидротехническое строительство, 1985, №4. – С. 41-45.

**СЕКЦИЯ 17**

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА:  
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**

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

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

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

## **ПЕРСПЕКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РАЙОНА КОСТРОМСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

В Костромской области одним из перспективных инвестиционных проектов является создание индустриального парка «Волгореченск» с нагрузкой 125 МВт, куда входят два завода: по производству труб и электрометаллургический [1].

Объектом исследования является Костромская энергосистема и режимы ее работы с учетом перспективных промышленных нагрузок.

Целью работы является разработка перспективной схемы электрической сети района энергосистемы с учетом ее развития.

Проведен анализ энергетической ситуации и существующей схемы и выявлены ее проблемные узлы.

Основным питающим центром энергосистемы Костромской области является Костромская ГРЭС, которая обеспечивает электроснабжение потребителей Костромской, Ивановской, Ярославской, Владимирской, Московской и Нижегородской областей.

Определены перспективные нагрузки индустриального центра с учетом увеличения объема производства существующего трубного завода.

По результатам анализа существующей схемы электроснабжения района установлено, что схемы присоединения к сети некоторых подстанций и отдельные линии электропередачи и подстанции находятся в неудовлетворительном состоянии и требуют реконструкции.

По результатам анализа энергетической ситуации намечена разработка вариантов перспективной схемы внешнего электроснабжения потребителей с учетом Ивановской и Костромской энергосистем.

### **Библиографический список**

1. **Постановление** №73 от 29 апреля 2020 года .Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетики Костромской области до 2025 года.— URL: <https://docs.cntd.ru/document/570791187> (дата обращения 2023- 16-12).

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

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

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 [1].

Объектом исследования является система электроснабжения, содержащая электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Предметом исследования являются высшие гармоники напряжения.

Установлено, что высшие гармоники напряжения в системах электроснабжения негативно влияют на функционирование оборудования, что создает экономический ущерб. Это приводит к увеличению потерь мощности и снижению надежности энергосистемы. Несинусоидальность напряжения осложняет компенсацию реактивной мощности, сокращает срок службы оборудования и снижает эффективность функционирования устройств автоматики, телемеханики и связи.

Рассмотрены источники гармонических искажений – силовое электронное оборудование, сварочные машины, двигатели, генераторы, бытовая техника и т.д.; выявлены эффекты от высших гармоник напряжения и тока – явления мгновенного и длительного возникновения; определены мероприятия по ограничению высших гармоник – схемные решения и применение специальных технических средств.

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

### **Библиографический список**

1. Руди Д. Ю. и др. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения /Руди Д. Ю., Антонов А. И., Вишнягов М. Г., Горелов С. В., Зубанов Д. А., Руппель А. А., Руппель Е. Ю.// Омский научный вестник, 2018. № 6 (162). – С. 119–125. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-119-125.

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

## **ИННОВАЦИОННАЯ СИСТЕМА НАПРЯЖЕНИЯ 0,95 кВ**

В соответствии с распоряжением ПАО «Россети» от 26.09.2014 предложено сформировать в ряде Межрегиональных распределительных сетевых компаний перечень объектов для реализации пилотных проектов по переводу сети 0,4 кВ на класс напряжения 0,95 кВ, что подтверждает переход к активной фазе внедрения данного технического решения [1].

В распределительных электрических сетях существует ряд проблем из-за большого износа и срока эксплуатации оборудования, сокращения объемов нового строительства и реконструкции. Одним из решений является внедрение инновационных технологий, которые обеспечивают снижение потерь электрической энергии и повышение эффективности функционирования электрических сетей.

В связи с тем, что технически невозможно и экономически не обосновано решение вышеуказанных проблем посредством применения традиционных подходов к построению схем электроснабжения потребителей, передача электрической энергии на напряжении 0,95 кВ с использованием индивидуальных однофазных и трехфазных трансформаторов позволяет увеличить эффективную длину линии электропередачи, создать технические ограничения для несанкционированного подключения, увеличить пропускную способность низковольтной электрической сети, обеспечить нормативное отклонение напряжения в электрически удаленной точке. Также установлено, что наиболее экономически обоснованный вариант электроснабжения потребителей – комбинированная распределительная электрическая сеть 0,4-0,95 кВ [2].

Направлением дальнейших исследований является исследование эффективности применения системы напряжения 0,95 кВ и использование результатов в магистерской ВКР.

### **Библиографический список**

1. **Положение** о единой технической политике ОАО «Холдинг МРСК» в распределительном сетевом комплексе. Решение Совета директоров ОАО «Холдинг МРСК». Протокол № 64 от 07.10.2011
2. **Князев, В.** Энергоэффективная технология передачи электрической энергии на напряжение 0,95 Кв. [Электронный ресурс] // Электроэнергия. - 2016. - №5(38). – С.42-45.



*Е.М. Исаков, Д.В. Пискунов;  
рук. Г.А. Филатова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РЕЖИМАХ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

Работа цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения 6(10) кВ (ЦТТН) в условиях дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю (ДПОЗЗ) требует дополнительных исследований. Разработана методика экспериментального исследования работы ЦТТН в условиях ДПОЗЗ, с использованием программно-аппаратного комплекса (ПАК) RTDS. Разработана схема установки с трехфазными повышающими трансформаторами ТЛС 0,1/10 кВ, традиционными усилителями тока и напряжения PONOVO и ЦТТН 6-10 кВ с гальванически развязными каналами тока и напряжения. Управление моделью сети и ДПОЗЗ осуществляется в Runtime RSCAD [1]. Выбор теории ДПОЗЗ (теории В. Петерсена, Дж. Петерса и Х. Слепяна, Н.Н. Белякова), его длительности осуществляется оператором. Удаленность ДПОЗЗ и величина переходного сопротивления задается вручную или автоматизировано (с заданным оператором шагом и диапазоном изменения).

При анализе данных получено, что ЦТТН трансформирует сигнал практически без искажений. Было выявлено незначительное расхождение в области высоких частот (более 20 кГц), что допустимо при моделировании переходных процессов на воздушной линии (объект исследования) с частотами разрядных составляющих до 16 кГц. По результатам измерений, было получено, что после воздействия ДПОЗЗ основные характеристики ЦТТН не вышли за допустимые значения. А именно:

- сопротивление изоляции составило 1100 МОм;
- сопротивление резистивных делителей напряжения составило 15 – 15,1 МОм;
- уровень кажущегося заряда частичных разрядов составил <50 пКл;
- измерительный канал для целей коммерческого учета электроэнергии и измерений соответствует классу точности 0,2; измерительный канал для целей релейной защиты соответствует классу точности 3Р.

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 (RusAuto-Con), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 716-720.

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

## **СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

Производство электрической и тепловой энергии в непосредственной близости от конкретного потребителя с каждым годом становится все более актуальным.

Объекты малой энергетики позволяют снизить зависимость от источников большой генерации, что актуально, на случай ремонта или аварий в сетях. Основными критериями использования источников малой генерации являются их эффективность, экологичность и экономичность [1].

Выявлены проблемы при интеграции объектов малой генерации в распределительные электрические сети, которые требует индивидуально-го рассмотрения.

Распределенная генерация может работать в двух режимах:

– параллельная работа объекта РГ с ЭЭС, с обеспечением работы объекта РГ в базовой зоне графика нагрузки за счет получения из ЭЭС мощности в часы пиковых нагрузок и выдачи в ЭЭС избытков мощности в часы их минимума;

– изолированная работа объекта РГ (автономный режим) с полным обеспечением электроснабжения собственных потребителей во всех зонах графика нагрузки, ремонтных резервов технологической, функциональной и аварийной брони.

Распределительные сети с появлением в них источников малой генерации приобретают черты основной сети, то есть в них возникает проблема устойчивости, связанная с режимами работы генераторов и возникновением различных аварийных ситуаций (короткое замыкание, отключение генераторов и др.).

Направлением дальнейших исследований является моделирование режимов конкретной электрической сети с источником малой генерации и использование результатов в магистерской ВКР.

### **Библиографический список**

1. **Онлайн платформа** Академия «Распределенная генерация». Направления развития // Энергоэксперт, 2016. №3.

**В. А. Мольков, асп.;**  
**рук. К. В. Сулов, д.т.н., проф.**  
**(НИУ «МЭИ», г. Москва)**

## **АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗВИТИЯ ГИБРИДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВИЭ-СНЭЭ**

На текущий момент высокими темпами в России и во всем мире наблюдается значительный рост генерации электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ). В Российской Федерации в период с 2014 по 2023 гг. прирост ветровой и солнечной генерации составил 2508 МВт и 2165 МВт, соответственно. [1]

Заметное увеличение доли ВИЭ-генерации, имеющей стохастичный характер, создает потребность в необходимости энергосистемы повышать свою гибкость и способность оперативно реагировать на внутренние изменения. Новые решения должны быть, в том числе адаптированы и к краткосрочным временным периодам: вплоть до неполного часа. [2]

Обеспечение гибкости за счет развития механизмов управления спросом встречает ряд сложностей, как в нашей стране, так и за рубежом. Например, среди них можно выделить отсутствие необходимой правовой базы, недостаток стимулов для обеспечения гибкости и государственное вмешательство в розничные цены на электроэнергию. [3]

Среди прочих решений можно выделить работу объектов ВИЭ-генерации в комплексе с системами накопления электрической энергии (далее – СНЭЭ). Например, в 2022 году группа компаний «Хевел» и Системный оператор успешно провели испытания Бурзянской СЭС, крупнейшей в России СЭС с промышленными накопителями энергии. [4]

Автором статьи на текущий момент в рамках написания кандидатской диссертации проводится научное исследование на тему определения оптимального режима работы гибридных комплексов ВИЭ-СНЭЭ.

### **Библиографический список**

1. IRENA (2024), Renewable capacity statistics 2024, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
2. **D. Koolen, M. De Felice, S. Busch.** Flexibility requirements and the role of storage in future European power systems.
3. ACER, Demand response and other distributed energy resources: what barriers are holding them back? 2023 Market Monitoring Report.
4. Системный оператор и «Хевел» впервые в России испытали работу солнечной электростанции с накопителями электроэнергии в изолированном режиме // СО ЕЭС. 2022. URL: <https://www.so-ups.ru/news/press-release/press-release-view/news/18838/> (дата обращения: 09.04.2024).

*А.К.Сулов, Кизян Е.А. студ.;*  
*рук. К. В. Сулов, д.т.н., проф.*  
*(НИУ МЭИ, г. Москва)*

## ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ И ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ

Порядка 60-65 процентов территории России обеспечивается энергией за счёт технологически изолированных и удалённых систем энергоснабжения. По различным оценкам в зонах децентрализованного энергоснабжения расположено около 30 000 населённых пунктов. Одной из главных проблем энергоснабжения таких территорий является недостаточная надёжность обеспечения потребителей электрической и тепловой энергией.

Условно изолированные энергосистемы в России можно разделить на следующие группы [1]:

- крупные изолированные системы с установленной мощностью более 20 (30) МВт с сетями напряжением 110-220кВ;
- средние системы 5-20(30) МВт, которые имеют сети напряжением 6-10-20-35 кВ, в отдельных случаях 110 (220) кВ;
- малые системы до 5 МВт (напряжение 6-10-20кВ)



Рис.1. Зонирование территории России по степени централизации электроснабжения [2]

Данная классификация достаточно условна в виду нечеткости границ. Но, тем не менее, к первой группе следует относить Норильский промышленный узел, изолированные районы Саха (Якутии), энергосистемы

Чукотки, центрального энергорайона и Охинского энергоузла Сахалинской области, Камчатки, Магаданской области и др. Ко второй группе относятся более мелкие системы, такие как Бодайбинский и Мамско-Чуйский энергорайоны Иркутской области, Новиковский энергоузел Сахалинской области и ряд других. Малых изолированных систем на территории России расположено достаточно большое количество.

Крупные изолированные системы, как правило, по многим своим параметрам и условиям функционирования приближены к свойствам централизованной энергосистемы. Это связано с тем, что в таких системах имеются крупные электростанции и сети напряжением до 110-220кВ [3].

Энергоснабжение средних и малых систем энергоснабжения традиционно осуществляется посредством дизельных электростанций. На данных территориях преобладают небольшие поселения, что подразумевает незначительный уровень потребления энергии и невозможность установки крупных генерирующих мощностей.

Согласно данным Российского энергетического агентства, автономное энергоснабжение обеспечивает порядка 900 дизельных электростанций, потребляющих более 1 млн тонн дизельного топлива в год. Доставка дизельного топлива в изолированные и труднодоступные территории является сложной, трудоёмкой и финансово затратной задачей. Высокая транспортная составляющая приводит к высокому удельному весу топливной составляющей при производстве энергии. Годовые расходы на энергоснабжение изолированных территорий составляет более 150 млрд руб. Из которых: стоимость «северного» завоза - около 100 млрд руб. в год, возмещение разницы в тарифах – около 50 млрд руб.

Возможным решением по улучшению энергоснабжения децентрализованных территорий и снижению финансовых затрат является применение возобновляемых источников энергии, в том числе использование геотермальной и низкопотенциальной тепловой энергии. Однако при внедрении данных технологий следует учитывать географическое расположение потребителей, проводить анализ энергопотенциала региона и оценку технико-экономической эффективности внедрения технологий.

Производство электрической энергии на базе возобновляемых источников имеет ряд преимуществ:

- близость потребителя к генерирующим установкам, следовательно, снижение потерь на транспортировку и распределение электроэнергии;
- существенное уменьшение объёмов привозного топлива;
- снижение выбросов парниковых газов в атмосферу;
- повышение надёжности электроснабжения потребителей.



Рис.2. Карта геотермальных источников России [4]

Таким образом, внедрение возобновляемых источников энергии позволяет снизить финансовые затраты на обеспечение потребителей электроэнергией, улучшить экологическую обстановку регионов, также решить проблему эффективного использования ресурсов [5].

Стоит учесть, что выработка электроэнергии на базе возобновляемых источников непостоянна, появляется необходимость в использовании накопителей электроэнергии, получении точного ряда климатических данных и грамотном управлении технологическим процессом генерации. Немаловажным является мониторинг параметров энергокомплекса. Получение данных о параметрах установки позволяет внедрить автоматическое управление режимами энергокомплекса, что делает систему энергетически более эффективной и надёжной.

Что касается теплоснабжения, использование геотермальной энергии и низкопотенциального тепла имеет ряд преимуществ:

- нет необходимости в топливе для обеспечения потребителей отоплением и горячим водоснабжением;
- находятся близко к потребителю (избегаем потерей тепла в трубопроводах при транспортировке теплоносителя);
- экологическая чистота;
- надёжность (низкопотенциальный источник всегда доступен, перебои с поставкой топлива не влияют на обеспеченность потребителя теплоснабжением).

Таким образом, установка геотермальных источников способна значительно снизить недостаток тепловой и электрической энергии в отда-

ленных районах арктической зоны России, а создание небольших энергосистем с солнечными и ветряными станциями позволит приблизить к минимуму риск отключения электроэнергии.

#### **Библиографический список**

1. **Суслов, К.В. и др.** Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода / Суслов К.В., Шушпанов И.Н., Воронцов Д.В. // Изв. высших учебн. заведений. Проблемы энергетики, 2018. Т. 20. № 1-2. – С. 70-79.
2. **Энергетическое** снабжение изолированных территорий России / В.В.Елистратов // Академия энергетики, 2015. № 4(66). – С.26-33.
3. **Suslov, K.V., Voropai, N.I.** The microgrid concept and challenges in small isolated regions of Russia // CIGRE 2011 Bologna Symposium - The Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids, 2011.
4. <https://triptonkosti.ru/3-foto/karta-geotermalnyh-istochnikov-rossii-86-foto.html>
5. **Суслов, К.В.** Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 5 (124). – С. 131-142.

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

## **КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Одной из наиболее важных и актуальных проблем в области электро-снабжения является повышение качества электрической энергии в сетях энергетических систем и промышленных предприятий.

Использование качественной электроэнергии промышленных и бытовых потребителей всегда остается важным аспектом процесса производства и повседневной жизни людей. Основными показателями качества электроэнергии по ГОСТу[1] являются отклонение частоты, колебания напряжения, несинусоидальность тока и напряжения, несимметрия напряжения, фликер, доза фликера.

Проведен анализ, в ходе которого выявлены несоответствия показателей качества установленным нормам при работе различных групп потребителей, которые требуют индивидуального рассмотрения.

Рассмотрены:

- ПКЭ ИФВЭ;
- ПКЭ ПС «Плес»;
- ПКЭ ТП 10/0,4 кВ в районе.

Направлением дальнейших исследований является моделирование данных случаев отклонений показателей качества электроэнергии на объекте и использование результатов в магистерской ВКР.

### **Библиографический список**

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

2. **Жежеленко, И.В.** Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.



*М. И. Фокин, студ.;  
рук. О.А. Бушueva, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОБЪЕКТАХ ПАО «РОССЕТИ»**

Системы накопления электроэнергии (СНЭ) относятся к перспективным технологиям электросетевого комплекса [1]. Развитию этого направления уделяется большое внимание в распределительных сетях филиалов ПАО «Россети Центр» и «Россети Центр и Приволжье» [2].

Целью работы является ознакомление с опытом применения СНЭ в распределительных сетях компании ПАО «Россети».

Установлено, что первые проекты по внедрению СНЭ были реализованы в 2019 году в распределительных сетях 0,4 кВ ПАО «Россети Центр» - филиал «Белгородэнерго» и ПАО «Россети Центр» - филиал «Владимирэнерго».

Проведен анализ реализации проектов СНЭ в Белгородской, Владимирской, Ивановской, Ярославской и Воронежской областях.

Показаны конструктивные особенности СНЭ, схемы их подключения к объекту, системы управления.

Выявлены проблемы в эксплуатации СНЭ и особенности их монтажа.

Отмечены преимущества СНЭ на литий-ионных аккумуляторных батареях, как наиболее популярной технологии накопления энергии.

Приведены результаты оценки эффективности применения СНЭ для повышения надежности и качества электроснабжения потребителей.

Результаты работы рекомендованы к использованию в проектах СНЭ и в выпускной работе магистра.

### **Библиографический список**

1. **Энергетическая стратегия РФ до 2035 года.** [Электронный ресурс]. URL <http://doks.cntd.ru/document/5659068831> (дата обращения 18.04.2024).

2. **Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике: в электросетевом комплексе.** [Электронный ресурс]. URL [http://rosseti-sib.ru/upload/Polozhenie\\_o\\_ETP\\_2021](http://rosseti-sib.ru/upload/Polozhenie_o_ETP_2021) (дата обращения 18.04.2024).

**СЕКЦИЯ 18**

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ  
И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

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

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

*М.Ю. Алтухов, студ.;*  
*рук. Е.М. Новоселов, к.т.н.,*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Межвитковые замыкания являются одной из наиболее распространенных причин отказов асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций [1].

Рассматриваемый дефект в обмотке статора у двигателей небольшой мощности очень быстро приводит к значительным повреждениям электрических машин. Актуальной задачей является разработка методов диагностики, позволяющих выявить неисправность на ранней стадии.

Для выявления диагностических признаков межвитковых замыканий было выполнено математическое моделирование методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Maxwell. Для асинхронного двигателя 3ВР71-2 мощностью 250 Вт, с одной парой полюсов смоделированы следующие варианты неисправностей: добавление короткозамкнутого витка в один из пазов, замыкание 10 и 20 % витков в одной из катушек фазы А.

Для верификации модели, была выполнена регистрация тока статора и внутреннего магнитного поля двигателя 3ВР71-2 с одним короткозамкнутым витком на экспериментальном стенде.

Для анализа полученных результатов использовался спектральный анализ сигналов на основе быстрого преобразования Фурье.

Исследования показали, что при межвитковых замыканиях амплитуды гармонических составляющих спектра, указанных в [2] незначительно возрастают, что не позволяет с высокой степенью достоверности выявлять неисправность, поэтому целесообразно проведение исследований направленных на поиск более эффективных способов выявления рассматриваемой неисправности.

### **Библиографический список**

1. **Клоков, Б.К.** Ремонт обмоток электрических машин высокого напряжения: учебн. пособ. / Б.К. Клоков, Р.Б. Уманцев.—М.: Высшая школа, 1991. — 191 с.
2. **ГОСТ ISO 20958-2015.** Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. — М.: Стандартинформ, 2019. — 34с.

*Д.Д. Баркалов, студ.;  
рук. А. Лхамдондог, к.т.н.  
(НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ БРОСКОВ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ТОКОВ НА ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

В электроэнергетических системах силовые трансформаторы играют ключевую роль в работе всей электросети и делают возможным ее функционирование в том виде, в котором мы ее наблюдаем сегодня. Однако при подключении трансформатора к сети возникают броски намагничивающих токов (БНТ), которые ставят под угрозу работу электросети [1]. БНТ оказывают значительное воздействие на параметры трансформаторов. Они вызывают увеличение температуры обмоток возбуждения, что может привести к их перегреву и выходу из строя, повышение напряжения холостого хода трансформатора, и, как следствие появление перенапряжений в сети. Появление дополнительных потерь в трансформаторе приводит к снижению его КПД [2].

При отключении силового трансформатора магнитный поток не уменьшается до нуля, а остается на некотором уровне, который может превышать 80% номинальной магнитной индукции. Когда вновь производится включение силового трансформатора, магнитный поток начинает увеличиваться именно с точки, соответствующей уровню остаточного магнитного потока [3]. БНТ могут достигать значений, кратных токам короткого замыкания, что в свою очередь ведет к возможному отключению релейной защитой.

Задачей исследования являлась оценка воздействия на БНТ силового трансформатора при изменении нагрузки. Для решения поставленной задачи использован программный комплекс ЕМТР-RV, в котором разработана модель силового трансформатора типа ТРДН-25000/110. Результаты исследования позволяют выявить зависимости влияния БНТ от уровня нагрузки на вторичных обмотках, а также оценить изменения в гармоническом составе токов трансформатора.

### **Библиографический список**

1. **Силовые трансформаторы.** Справочная книга. / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
2. **Елагин, В. Н. и др.** Броски тока включения трансформатора. / Елагин, В. Н., Лурье А. И., Панибратец А. Н. // Электротехника, 1997. № 2.
3. **Цифровые устройства дифференциальной защиты.** Принципы и область применения. /Под ред. чл.-корр. РАН А.Ф. Дьякова. – М.:Энергоиздат, 2005. – 273 с.

*М.В. Власов, маг.;*  
*рук. А.С. Страхов, к.т.н.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ПОВЫШЕННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Приводами большинства механизмов собственных нужд на электрических станциях являются асинхронные электродвигатели. Отказ ряда асинхронных электродвигателей может привести к снижению мощности или отключению блока электростанции. Одной из причин отказов является повышенный динамический эксцентриситет машины, поэтому требуется разработка новых методов контроля и совершенствование существующих. Целью исследования является определение наиболее эффективного диагностического признака повышенного динамического эксцентриситета асинхронного электродвигателя на основе спектрального анализа.

Для достижения поставленной цели в программном комплексе «Ansys» был смоделирован электродвигатель типа АИР71А6 мощностью 370 Вт, номинальным напряжением 0,4 кВ при различном динамическом эксцентриситете, а также его отсутствии. Данный двигатель моделировался с различной нагрузкой.

Регистрировались сигналы тока статора, внешнего и внутреннего магнитных полей. Расчет магнитных полей осуществлялся на основе метода конечных элементов. Обработка полученных сигналов осуществлялась в программном комплексе «MatLab» на основе метода быстрого преобразования Фурье с применением окна Флэттоп для более точного определения амплитуд гармонических составляющих.

В ходе анализа полученных результатов было показано, что при наличии динамического эксцентриситета в спектре сигналов значительно возрастают амплитуды характерных гармоник с частотами, которые можно определить по выражению:  $f_{ГДЭ} = f_c \cdot \left( k \pm \nu \cdot \frac{1-s}{p} \right)$ , где  $f_c$  – частота сети, Гц;  $k = 1, 3, 5, 7, \dots$ ;  $\nu = 1, 2$ ;  $s$  – скольжение асинхронного двигателя;  $p$  – число пар полюсов.

Для выявления динамического эксцентриситета асинхронного двигателя могут быть использованы все три исследуемых сигнала, но лучшим из них является внешнее магнитное поле. Также было выявлено, что при высокой нагрузке асинхронного двигателя характерные для динамического эксцентриситета гармоники проявляются хуже.

*Д.Н. Гаврилов, Д.А. Говоров, маг.;*  
*рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО ИЗУЧЕНИЮ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА**

На подстанции предусматривается система оперативного постоянного тока (СОПТ) с номинальным напряжением 220 В. Данная система обеспечивает бесперебойное рабочее и резервное электропитание потребителей оперативного постоянного тока.

В Ивановском государственном энергетическом университете были установлены шкафы системы оперативного постоянного тока.

В работе были изучены шкаф аккумуляторных батарей и шкаф оперативного тока, производства ЭКРА, которые питают 7 шкафов релейной защиты.

В шкафу аккумуляторных батарей (АБ) находится 17 моноблоков которые выдают на шины ЕС1 220 В. Аккумуляторная батарея работает в режиме постоянного подзаряда с включенным на шинки АБ через блок выносных предохранителей зарядно-подзарядным устройством. В шкафу оперативного тока установлены два зарядно-подзарядных устройства. Шкаф имеет трехуровневую систему защиты, при этом обеспечено дальнейшее резервирование автоматических выключателей нижнего уровня защиты действием плавких предохранителей среднего уровня защиты. Выявление неисправности компонентов СОПТ осуществляется автоматически средствами мониторинга и средствами самодиагностики элементов СОПТ.

Так же в работе была изучена документация, схемы подключения шкафов, монтаж, диагностика и работа с ними. В дальнейшем будут разработаны методические указания для проведения лабораторных работ для студентов, которое должно дать студентам не только теоретические знания, но и практические.

В методических указаниях будет рассмотрено: монтаж, принцип работы со шкафами, снятие показаний, моделирование различных ситуаций и другая оперативная работа. На практике будут отрабатываться ситуации поиска земли, разряда и заряда батарей, и т.п.

*О.А. Глазков, маг.;*  
*рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ АНАЛИЗА И ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

На сегодняшний день наиболее распространёнными видами электрических машин являются асинхронные двигатели, в связи, с чем появляются вопросы, связанные с диагностикой технического состояния данных агрегатов.

В Ивановском государственном энергетическом университете в настоящее время разрабатывается лабораторный стенд для повышения квалификации обнаружения межвитковых замыканий в асинхронном электродвигателе с помощью понижающего трансформатора и шарика от подшипника.

В работе был изучен ряд способов диагностирования межвитковых замыканий и определены наиболее надёжного и оптимального для дальнейшего изучения способа диагностики технического состояния двигателей.

Основными способами диагностирования межвитковых замыканий являются следующие способы: диагностирование с помощью токовых клещей путем измерения нагрузки на каждую фазу; прозвон каждой обмотки в отдельности с помощью тестера; диагностирование с помощью мегомметра; диагностика межвитковых замыканий визуальным способом и диагностирование с помощью понижающего трехфазного трансформатора и шарика от подшипника или пластинки от трансформаторного железа.

В дальнейшем будут разработаны методические указания для проведения лабораторных работ для студентов, которое должно дать студентам не только теоретические знания, но и практические.

В методических указаниях будет рассмотрено: методы диагностирования, эффективность применения тех или иных способов диагностики.

*К.С. Ковалева, А.Д. Ким, студ.;  
рук. А. Лхамдондог, к.т.н.  
(НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАБОТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

В настоящее время силовые трансформаторы (СТ) являются главными преобразователями энергии. В электроэнергетике СТ находят применение на все классы напряжения. Одним из основных конструктивных элементов является магнитопровод СТ, выполненный из шихтованной электротехнической стали, для которой характерны процессы насыщения. Насыщение СТ приводит к искажению кривых выходных тока и напряжения, вследствие чего увеличивается риск отключения СТ, который повлечет за собой ущерб для потребителя [1]. Одной из причин насыщения СТ могут стать геоиндуцированные токи (ГИТ).

При возникновении геомагнитных возмущений в заземленных нейтралях силовых трансформаторов начинает протекать ГИТ, представляющие собой электрические токи частотой от нескольких Гц и выше. Частота ГИТ зависит от многих факторов, таких как местоположение, глубина залегания проводников, магнитное поле Земли и других. ГИТ обычно нежелательны, так как они могут вызывать потери энергии, нагрев магнитопровода и снижение эффективности работы трансформатора. Для борьбы с этими токами используются специальные меры, такие как применение материалов с низкой проводимостью, разделение магнитопровода на несколько частей и применение специальных технологий намотки [2].

Задачей исследования являлась оценка воздействия геомагнитных возмущений на работу трансформатора. В результате исследования проведен сравнительный анализ ручного и компьютерного расчета, а также разработана расчетная двухмерная модель трансформатора. Модель трансформатора позволит определить изменения в распределении электромагнитных полей при протекании ГИТ.

### **Библиографический список**

1. **Статья** «Основные источники искажений в силовых сетях объектов: трансформаторы» опубликована на сайте компании «МИРКОН».
2. **“Optimization of core and coil designs for minimizing the eddy current losses in transformers during geomagnetic disturbances”** by A. T. M. Ibrahim, S. Mekhilef, M. Z. A. Yahya, and M. R. A. Hamidon, 2014 IETE Technical Review, Volume: 31, Issue: 4. – pp. 338-344.



*Б.Э. Кочаров, студ.;*  
*рук. В.В. Батаева, ст. препод.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРИЧИН НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 35-500 КВ**

Более 70 % отказов силовых трансформаторов 35-500 кВ происходит из-за повреждений обмоток и переключателя ответвлений РПН и ПБВ. [1].

Силовой трансформатор находится в эксплуатации десятки лет. За это время, вследствие существенного изменения схем прилегающей электрической сети, значительно меняются уровни токов короткого замыкания по сравнению с расчётными. Длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора и недостаточная электродинамическая стойкость обмоток к токам КЗ приводят к выгоранию витковой изоляции обмотки, витков и деформации обмоток.

Снижение электрической прочности маслябъерной изоляции и пробой масляного канала влечёт за собой развитие «ползущего разряда» и ионизационный пробой витковой изоляции за счёт вытеснения масла водяным паром из капилляров изоляции. Причиной возникновения таких последствий является увлажнение и загрязнение изоляции обмоток в результате естественного износа изоляции, нарушения ее механической прочности и нарушении герметичности бака силового трансформатора при продолжительности его работы более 15 лет[2].

Неработоспособность РНП возникает в результате искрения, перегрева, оплавления и выгорания контактов, механического износа элементов кинематической системы в результате старения материалов.

Одним из направлений улучшения надежности показателей работы электроэнергетических систем является учет результатов оценки состояния силовых трансформаторов во время их эксплуатации. Поэтому актуальной задачей является совершенствование существующих методов и средств контроля и сбора диагностических параметров для определения их текущего технического состояния.

### **Библиографический список**

1. **Давиденко, И.В. и др.** Вопросы анализа надежности трансформаторного оборудования 35-110 кВ. /Давиденко, И.В., Овчинников К.В., Халикова Е.Д. 2013.– 60-63 с.

2. **Марков, Е.В.** Анализ повреждаемости силовых трансформаторов электроэнергетических систем. Исследования молодых учёных. / Марков, Е.В., 2023, – 11 с.

*И.В. Кравченко, студ.;  
рук. Е.М. Новосёлов, к.т.н., доц.;  
Т.Н. Шмелёва, к.ф.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MECHANICAL DEFECTS ON THE STATOR CURRENT OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR**

In the modern world, electric motors are widely used in various fields of industry and technology. Unstable operation and potential damage can lead to costly repairs or even the need for replacement, as well as the disruption of the technological process. Due to the importance of this issue, various scientific papers related to the diagnosis of electric motors by stator current have been studied.

The purpose of this work is to study the effect of mechanical failures on the stator current of asynchronous electric motors.

In a number of articles [1,2,3], it is highlighted that the method of fault diagnosis based on spectral analysis is one of the most functional and promising. To carry out the research in these works, test benches with asynchronous electric motors of several brands were assembled. Various defects were simulated on the stands, after which the instantaneous values of currents and voltages were digitized and recorded on a computer for further processing in the Matlab software package. Thus, informative harmonics have been identified, which make it possible to identify a number of malfunctions of electric motors.

Based on the studied materials, it can be concluded that despite the availability of scientific papers on this topic, the diagnosis of electric motors by stator current remains poorly studied and further research and improvements are needed. The study of the effect of mechanical failures on the stator current of asynchronous electric motors will help specialists in identifying and eliminating defects, thereby increasing the efficiency of electric motors and their durability.

### **Bibliographic list**

1. **Safin N.R.** DIAGNOSTICS OF INDUCTION MOTORS BASED ON SPECTRAL ANALYSIS OF STATOR CURRENTS / Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievsky V.A., Dmitrievsky A.A. Kazakbaev V.M. // Energy security and energy saving , 2014. №. 3. – pp. 34-39.

2. **Yagubov Z.H.** ON THE INVESTIGATION OF THE PROCESS DETECTING DEFECTS OF THE COMPRESSOR EQUIPMENT HARMONIC STRUCTURE OF THE STATOR CURRENT OF THE MOTOR / Yagubov Z.H., Shichev P.S., Teterlevleva E.V., Dementiev I.A. // Electronic scientific journal oil and gas business , 2015. №. 4. – pp. 473-496.

3. **Safin N.R.** STATOR CURRENT FAULT DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTOR BEARINGS BASED ON THE FAST FOURIER TRANSFORM / Safin N.R., Prakht V.A., Dmitrievsky V.A., Dmitrievsky A.A. // Electrical Engineering, 2016. №.12. – pp. 16-21.

*Д.Д. Мавлиханова, студ.;  
рук. В.М.Лапишин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ДОПУСТИМЫЕ ПЕРЕГРУЗКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ СРОКА СЛУЖБЫ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

Приказом №81 от 08.02.2019 г. [1] Минэнерго РФ ввело новые значения допустимых аварийных перегрузок силовых трансформаторов с учетом реального срока службы и технического состояния основных функциональных узлов (ИТСУ). В расчет принимаются основные функциональные узлы: «Изоляционная система», «Магнитопровод» и «Обмотки трансформатора».

Обращает на себя внимание тот факт, что рекомендованные аварийные перегрузки в соответствии с [1], ориентированы на продолжительность перегрузки и температуру окружающей среды, не учитывают плотность графика. Чтобы разобраться с этим вопросом были проведены тщательные расчеты по определению износа витковой изоляции масляных трансформаторов.

За основу расчетов принят трансформатор ТРДН-40000 кВА с учетом заданного графика нагрузки.

Нагрузочная способность трансформатора была проверена в соответствии с [2] с использованием двухступенчатого эквивалентного графика нагрузки. Точность расчетов обеспечивалась разбиением зоны перегрузки (продолжительность этой зоны составила 5 часов) на короткие отрезки, в пределах которых нивелировалась нелинейность изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки, искажающая точность расчетов по определению относительного износа изоляции.

Дальнейшие расчеты проводились для трансформатора той же мощности с известным сроком службы и значениями ИТСУ с использованием того же графика нагрузки, но максимальная перегрузка была снижена в соответствии с рекомендациями [1].

Расчеты подтвердили рекомендации по перегрузке и разбиению трансформаторов на группы, допускающие относительный износ изоляции в зоне перегрузки выше «нормального износа» или не допускающие превышение «нормального износа».

### **Библиографический список**

1. **Приказ** Минэнерго РФ №81 от 08.02.2019 г. «Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов».
2. **ГОСТ** 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.

*К.Ю. Макаров, студ.;*  
*рук. А. Лхамдондог, к.т.н.*  
*НИУ МЭИ, г. Москва*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА НА ПРОЦЕССЫ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ**

В современных электроэнергетических системах измерительные трансформаторы тока (ТТ) играют ключевую роль в обеспечении точности измерений и бесперебойной работы устройств релейной защиты (РЗ) [1]. Однако, за счет применения магнитопровода с нелинейной характеристикой в ТТ и изменения в нем потокосцепления при коротком замыкании (КЗ) происходит процесс насыщения, что может стать причиной неисправной работы устройств РЗ [2].

Процессы насыщения провоцируют несимметричное искажение формы кривой вторичного тока ТТ, из-за чего информация о первичном токе поступает на устройства позже фактического времени начала аварии, что может вызывать серьезные последствия, вплоть до выпадения из синхронизма генераторов или двигателей. Особенности строения электромагнитных ТТ подводят к тому, что проблема связана с физическим принципом работы, поэтому к окончательному решению ее устранения прийти практически невозможно.

Задачей исследования являлось определение времени до насыщения ТТ и влияния продолжительности и амплитуды КЗ на данный процесс. Для решения поставленной задачи использован программный комплекс SimInTech, в котором разработана модель ТТ типа ТПОЛ-10 300/5 [3]. Результаты исследования позволяют выявить зависимости влияния параметров вторичных цепей ТТ на их насыщение, и разработать рекомендации по расчету времени, что существенно улучшит надежность электроэнергетических систем, предотвращая ложные срабатывания и несрабатывания устройств РЗ [4].

### **Библиографический список**

1. **Старшинов, В.А. и др.** Электрическая часть электростанций и подстанций: учеб. пособ. для вузов. / Старшинов В.А., Пираторов М.В., Козина М.В. — М.: изд. дом МЭИ, 2015.
2. **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.
3. **Справочная** система SimInTech (v30.12.2023) [Электронный ресурс] // SimInTech URL: <https://help.simintech.ru> (дата обращения: 23.03.2024).
4. **ГОСТ Р 58669-2019.** Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях. — М.: изд-во стандартов, 2020.

*Д. А. Мирохватов, студ., Е. А. Рождественская;  
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

Асинхронный двигатель (АД) является наиболее распространённым видом электрической машины на сегодняшний день, поэтому остро стоит вопрос о контроле его состояния. Одним из наиболее часто встречающихся видов неисправности АД является межвитковое замыкание обмотки статора. Существующие сегодня методы диагностики межвиткового замыкания не обладают высокой чувствительностью к малому числу короткозамкнутых витков.

Целью исследований является выделение диагностического признака наличия межвитковых замыканий в обмотке статора АД по току статора.

Исследование проводилось с помощью модели АД, построенной в программном комплексе Ansys. Полученные результаты были обработаны методом, основанным на анализе параметров спектра гармонических составляющих токов электродвигателя. Суть этого метода диагностики заключается в регистрации фазных токов АД и последующим спектральным анализом посредством применения оконного преобразования Фурье FFT (Short-Time Fourier Transform).

Гармонический анализ тока статора исследуемого АД показал, что наряду с зубцовыми гармоническими составляющими наблюдается рост амплитуды гармоники частотой 150 Гц [1]. В процессе исследования выявлено, что значение амплитуды данной гармоники увеличивается прямо пропорционально соотношению короткозамкнутых витков в поврежденной фазе обмотки статора. При отсутствии повреждений гармоника частотой 150 Гц не проявляется. Амплитуда зубцовых гармонических составляющих так же увеличивается с ростом короткозамкнутых витков в поврежденной фазе обмотки статора. Анализ величины тока в короткозамкнутых витках показал, что по мере увеличения процентного соотношения короткозамкнутых витков, ток через них уменьшается.

### **Библиографический список**

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

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА В ЦЕЛЯХ ДИАГНОСТИКИ 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 для предотвращения аварийных отказов, которые могут привести к большому экономическому ущербу для электрических станций.

Одним из инструментов, которые можно использовать в процессе проведения диагностики асинхронных двигателей, служит 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. Чаще всего преобразование Гильберта используется для получения огибающей диагностического сигнала.

Целью данного научного исследования является изучение возможностей применения преобразования Гильберта для диагностики состояния асинхронных двигателей.

Исследования проводились на компьютерной модели, разработанной в программном комплексе Ansys. За основу модели был взят электродвигатель марки АИР71А6 мощностью 370 Вт. Рассматривался двигатель в нормальном состоянии, при наличии одного оборванного стержня и при наличии динамического эксцентриситета, величина которого составляет 40% от величины воздушного зазора. Исследовались сигналы тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля при номинальной нагрузке двигателя и в режиме холостого хода. Обработка полученных сигналов с помощью преобразования Гильберта производилась в программном комплексе MatLab.

В результате проведенных исследований было показано, что выявить обрыв стержня на основе преобразования Гильберта не представляется возможным, в то время как наличие динамического эксцентриситета может быть обнаружено. Таким образом, применение преобразования Гильберта позволяет определить некоторые дефекты асинхронных электродвигателей, но требуется проведение более детальных исследований сигналов, в том числе с помощью метода спектрального анализа.

*Е.С. Подшивалов, П.С. Сергеев, асп.;*  
*рук. О.В. Крюков, д.т.н.,*  
*(ООО «ТСН-электро», Н. Новгород)*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

По причине динамичного развития и широкого распространения систем накопления электроэнергии, существует необходимость в разработке оптимального алгоритма работы для гибридной системы накопления электроэнергии [1]. Совершенствование алгоритма работы таких систем позволит увеличить эффективность применения их на различных объектах АПК.

В качестве объекта исследования был выбран алгоритм управления накопителей электроэнергии, который определяет в каком из режимов (заряд или разряд) работает установка в определенный момент времени. Данный алгоритм построен на таких параметрах, как степень заряда аккумуляторов и режима в сети [2]. Но для применения данного алгоритма к гибридным системам накопления электроэнергии на двухэлементной базе (аккумуляторы и батареи суперконденсаторы) в него необходимо внести дополнительные параметры и уровни приоритетности.

В данном исследовании были введены уровни приоритета, согласно которым включаются в работу аккумуляторные, либо суперконденсаторные батареи. В результате проведенных исследований в алгоритм работы накопителей электроэнергии были введены приоритеты, согласно которым при снижении или повышении нагрузки в сети первыми включались в работу суперконденсаторные батареи, так как имеют больший ресурс по циклам В-О, а затем уже, если данный режим в сети имеет длительный характер, включаются в работу аккумуляторные батареи [3]. Результаты исследования позволили сформировать оптимальный алгоритм работы, соответствующий наибольшей эффективности гибридной установки.

### **Библиографический список**

1. **Васенин, А.Б. и др.** Автономная система бесперебойного электроснабжения, использующая возобновляемый источник энергии / Васенин А.Б., Крюков О.В., Титов В.Г. // Патент на полезную модель RU 113615 U1, 20.02.2012.
2. **Куликов А. Л.** Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики / Куликов А. Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. // Вестник НГИЭИ, 2018, № 11. – С. 123-136.
3. **Бердников, Р.Н. и др.** Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Сон Э.Е., Шакарян Ю.Г. // Энергия единой сети, 2013, № 2 (7). – С 40-51.

*Д.С. Пырин, студ.;*  
*рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРОВ ПРИ КЗ В ПРИСОЕДИНЕНИЯХ 6 кВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Безотказную работу электростанции в целом во многом обеспечивает надежность работы системы собственных нужд. Повышенные требования предъявляются к кабельной сети. Традиционные компоновочные решения привели к тому, что кабельные линии находятся в пределах основных производственных помещений (главного корпуса).

В этой связи аварийные ситуации в кабельной сети могут привести не только к колоссальному материальному ущербу, но и к реальной опасности для здоровья и жизни обслуживающего персонала.

Наиболее трудные условия возникают в режиме КЗ при отказе основной быстродействующей защиты или выключателя поврежденного присоединения. В такой ситуации используется УРОВ, приводящее к отключению ввода от ТСН на секцию собственных нужд 6 кВ с поврежденным присоединением. Следует отметить, что отключение ввода секции 6 кВ устраняет только протекание тока КЗ «от системы», но токи подпитки от параллельно включенных двигателей продолжают поступать в место повреждения. Важной особенностью КЗ к указанной расчетной точке является неизменное действующее значение периодического тока КЗ «от системы» и затухание периодического тока подпитки от группы асинхронных двигателей.

Методы расчета теплового состояния кабельной сети при совместном действии тока КЗ «от системы» и тока подпитки от группы двигателей хорошо отработаны. Но особый интерес представляет «дополнительный» интеграл Джоуля, определяемый токами подпитки после отключения выключателя ввода, то есть после прекращения совместного действия. От этого зависит целесообразность включения в систему УРОВ и выключателей неповрежденных присоединений.

Представляемая работа содержит проведенные расчеты для системы собственных нужд пылеугольного блока 300 МВт. Группа двигателей представлена параметрами эквивалентного двигателя 6 кВ.

### **Библиографический список**

- 1. Короткие замыкания в электроустановках.** Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. ГОСТ Р 52736-2007.
- 2. О проверке кабелей на возгорание при действии тока короткого замыкания.** Циркуляр №Ц-02-98 (Э). РАО «ЕЭС России», 1998.



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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СО СТАТИЧЕСКИМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ**

Статический эксцентриситет асинхронного электродвигателя является одним из дефектов, возникающих при работе, который по различным причинам может привести к отказу электродвигателя. Вследствие него происходит около 10% от общего числа отказов. Отказ асинхронного двигателя может привести не только к необходимости его дорогостоящего ремонта или даже замены, но и к возможности нарушения технологического процесса. Например, на электрических станциях отказ питательного насоса приведет к необходимости останова энергоблока. Вследствие этого нужно разработать надежный и эффективный метод выявления статического эксцентриситета, чтобы данный дефект не приводил к серьёзным авариям.

Целью данной статьи является анализ спектров сигналов внутреннего магнитного поля (ВМП), внешнего магнитного поля (ВнМП) и тока статора (ТС) при наличии или отсутствии статического эксцентриситета при различной нагрузке.

Исследования проводились на компьютерной модели, разработанной в программном комплексе Ansys. За основу модели был взят электродвигатель марки 4А132S4У3 мощностью 7500 Вт с двумя парами полюсов. Величина смещения ротора при статическом эксцентриситете была принята равной 30% от величины воздушного зазора. Были рассмотрены два режима работы электродвигателя: холостой ход и номинальная нагрузка. В программном комплексе MatLab произведена обработка зарегистрированных сигналов с помощью метода быстрого преобразования Фурье, в результате были получены амплитудные спектры сигналов.

Изучение спектров показало, что при статическом эксцентриситете в некоторых точках возрастают амплитуды гармонических составляющих с частотой 100 Гц и кратными ей. Также при анализе сигналов ВнМП было показано, что при наличии статического эксцентриситета в спектре отчетливо проявляются гармоники с частотами, близкими к  $(25+50 \cdot k)$  Гц, где  $k$  – целое число.

В дальнейшем планируется проведение исследований на моделях других электродвигателей в различных режимах, в том числе и переходных.

*Д. В. Смирнов, студ.;  
рук. Т.Н. Шмелева, к.ф.н., доц., Е.М. Новоселов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **THE EFFECTS OF MECHANICAL DEFECTS ON THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR**

Currently, electric motors are widely used in various fields of industry and technology. However, over time, many of them may encounter problems related to operation and maintenance. Unstable operation and electric motors damage have an effect on the external magnetic field. Therefore, this topic is relevant nowadays.

The article [1] presents the results of the development and application of a hardware and software complex for assessing the vibration level and the strength of the external magnetic field of asynchronous electric motors in order to diagnose defects. Experimental measurements were carried out on several electric motors using a developed compact portable device equipped with an integrated Hall sensor. Taking into account the results of the analysis of vibration and the distribution of the external magnetic field of the motor, it is possible to obtain a detailed list of defects that must be eliminated in the future, thereby increasing the efficiency of electric motors and their durability.

Modern methods, tools and technologies for diagnostics and monitoring of asynchronous motors have a number of disadvantages due to the limitations of the methods and algorithms used and the obsolescence of standard technologies. As a solution to this problem, the article [2] presents a method for controlling eddy currents. The physical principle is based on the analysis of the interaction of an external electromagnetic field with the electromagnetic field of eddy currents induced by an excitation coil in the test object. This method is best used to detect inter-turn faults, which are among the most common in asynchronous electric motors.

Summing up, our research has shown that engineers are working on developing new methods for diagnosing the external magnetic field of asynchronous electric motors. The study of control and diagnostic methods based on the parameters of an external magnetic field allows us to obtain reliable information not only about the types of defects, but also about their severity.

### **Bibliographic list**

1. **Exploration** of the combined vibration parameters and external magnetic field in diagnosing asynchronous electric motors (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401017>
2. **Analysis** of the methods of diagnosing asynchronous motors according to vibration indicators (2023) [DOI 10.1088/1755-1315/1142/1/012031](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012031)

Г. Д. Смирнов, маг.;  
 рук. И. Н. Сулыненков, к. т. н., доц.  
 (ИГЭУ, г. Иваново)

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Распределительные устройства (РУ) являются неотъемлемой частью электрических станций и подстанций и представляют собой совокупности электрооборудования, соединенные между собой по определенным схемам. Развитие технологий в аппаратостроении приводит к появлению электрооборудования РУ повышенной надежности. Вслед за этим происходит изменение показателей надежности схем РУ, что влечет за собой необходимость пересмотра подходов в схемных решениях. Однако расчет схем РУ вероятностными методами достаточно трудоемок. Поэтому задача разработки автоматизированных алгоритмов по расчету схемной надежности РУ является актуальной.

В работе авторы разработали алгоритм, который позволяет автоматизировать расчет показателей надежности схем РУ. В качестве исходного метода использовался метод на основе цепей Маркова. Ручные вычисления, производимые данным методом крайне затруднительны. В частности, для схемы РУ «Одна рабочая секционированная выключателем система шин» с 4 присоединениями цепи Маркова насчитывают 48 возможных состояний системы.

В докладе представлен алгоритм для автоматизации составления графа состояний и произведен расчет схемной надежности. Представленные результаты позволят провести многовариантные расчеты надежности схем РУ, что позволит выполнить сравнение схем и сформулировать рекомендации по применению схем в условиях использования современного высоконадежного оборудования.

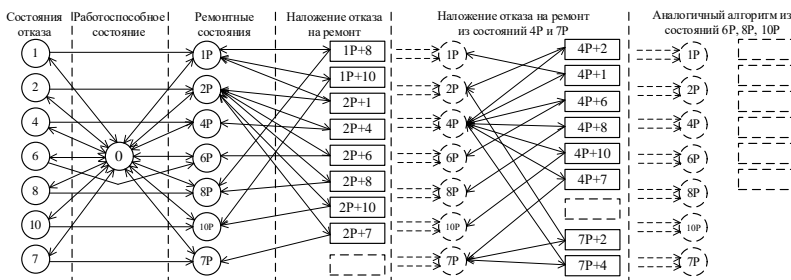


Рис. 1. Граф состояний упрощенной схемы РУ

**СЕКЦИЯ 19**

**ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

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

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

*А.Е. Баранов, студ.;*  
*рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПОЛИМЕРНЫХ ШТЫРЕВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

Для линий электропередачи ВЛ 6-35 кВ все чаще применяют провода с защитной изолирующей оболочкой. При этом в качестве линейной изоляции используют штыревые изоляторы, в том числе и полимерные (ПШИ).

При создании новых типов ПШИ необходимо учитывать ряд условий, обеспечивающих требуемое распределение напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора и отсутствие перекрытий участков изоляции при испытательном напряжении.

Изучение распределения напряженности электрического поля вдоль пути тока утечки [1] позволяет определить влияние формы изолятора на электрическую прочность внешней изоляции. На данный момент нет методик анализа эффективности использования объема изоляции. Существующие рекомендации предлагают увеличение длины пути тока утечки для обеспечения необходимой электрической прочности внешней изоляции.

Современные программные комплексы позволяют анализировать соответствие формы профиля новых ПШИ без создания их физических прототипов. Это дает возможность получать оптимальные конструкции изоляторов на стадии проектирования, до проведения натурных испытаний. Оптимизация формы внешней изоляции позволяет снизить объем, используемого изоляционного материала, без потери электроизоляционных качеств. Это позволит повысить экономическую эффективность использования изоляционных конструкций за счет:

1. снижения себестоимости изоляторов, а также снижение издержек на их транспортировку и монтаж;
2. использования более качественных изоляционных материалов без повышения стоимости изоляционных конструкций в целом, что позволит повысить надежность работы электроустановок и срок службы самих изоляционных конструкций.

### **Библиографический список**

1. **Александров, Г.Н.** Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, В.Е. Кизеветтер. Ленинградское отд. изд-ва «Энергия», Марсово поле, 1, 1969. — 327 с.

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

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ И МАЛО ЗАТРАТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР И КОНСТРУКЦИЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ В ВЕЧНО МЕРЗЛЫХ И НЕСТАБИЛЬНЫХ ГРУНТАХ ОПОР ЛЭП 35-110 КВ**

Сегодня нам приходится эксплуатировать здания и сооружения в совершенно других условиях, иногда не прогнозируемых и не управляемых: постоянное изменение климата, температуры, увеличение количества осадков, в том числе снега, изменчивость продолжительности теплого периода года, изменение физико-механических свойств грунтов. И совсем не обязательно, чтобы мерзлотные грунты начали таять. Увеличения их температуры вполне достаточно [1].

Рассмотрены действующие мероприятия по укреплению железобетонных опор и конструкций, установленных в вечно мерзлых и нестабильных грунтах опор ЛЭП 35-110 кВ а именно:

- обваловка фундаментов опор;
- установка термостабилизаторов;
- усиление фундаментов крестовыми сваями.

Проведя сравнительный анализ, можно прийти к выводу, что, недостатки вызваны необходимостью капитальных инвестиций в уже имеющиеся ЛЭП.

Для решения конкретной задачи все меры необходимо рассматривать в совокупности, а также учитывать климатические особенности региона.

Направлением дальнейших исследований является технико-экономическое обоснование каждого метода и использование результатов в магистерской ВКР.

### **Библиографический список**

1. **Охлопкова, Т.В. и др.** Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты / Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5258](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5258).

2. **Техника** высоких напряжений: курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск: изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.

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

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОСТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

Относительно новым явлением в структуре энергопотребления России и мира являются электромобили. Во многих крупных странах их насчитывается сотни тысяч, но в России только предстоит преодолеть этот порог. Задача исследования в изучении текущего влияния электрокаров на энергетику в РФ и прогнозирование изменения энергопотребления и влияния не него электромобилей в будущем.

Для первичного анализа влияния электромобилей на потребление энергии были использованы обширные данные распределительных компаний США (находясь в доступе), т.к. США ближе к России по структуре потребления энергии.

Выявлено, что сезонные тенденции энергопотребления США отличаются от Российских - в США имеется два пика энергопотребления, в январе и июле, в России же только один - в начале года. Тренды в посуточном потреблении схожи - пик вечером, с 17 до 19 часов. Для прогнозирования энергопотребления в России были использованы данные Ярэнерго (наиболее близкая область к Ивановской, число электромобилей более чем в Иваново).

Данные представлены в виде pandas DataFrame, содержат дату в формате datetime, и число мегаватт энергии. При выборе модели были рассмотрены Prophet, градиентные бустинги Catboost, XGBoost и LightGBM. Для подсчета ошибки были использованы метрики l2, RMSE, для оценки - MAE. Среди всех моделей лучший результат без подбора параметров показал Catboost с MAE равном 13,522. После при помощи библиотеки optuna был произведен подбор параметров, и лучшей после тюнинга стала LightGBM с MAE 2,2. При помощи Prophet был создан набор данных на 7 дней вперед и произведен прогноз, и аналогичным образом на месяц и 3 месяца. При сравнении графическим методом выявлено, что все основные тенденции в данных сохраняются. После произведен прогноз на год вперед, рост составил 0.26% относительно предыдущего. По данным исследования [1] число электромобилей значительно опережает энергопотребление по темпам роста, и уже к концу 2030 года их число возрастёт в 3-4 раза, а с учётом растущей ёмкости аккумуляторов новых электрокаров, создаст значительную нагрузку на энергосистему – в зимнее время от 5 до 6.5%, в летнее время от 7 до 8%.

### **Библиографический список**

1. **Российский рынок электромобилей: будущее «зеленого» автомобилестроения.**

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

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ В РФ**

Относительно новым явлением в структуре энергопотребления России и мира являются электромобили. В России, по разным оценкам, к началу 2024 года зарегистрировано 35 - 40 тыс. электромобилей, что соответствует 0.09% от общего числа автомобилей в стране, однако, по оценке консалтинговой компании «Деловой профиль»[1] к 2030 году число электромобилей в России достигнет 1,5 - 2 млн. шт., что составляет 2,3 - 3%.

На основе данных, содержащих информацию о почасовом полезном распределении энергии в Ярэнерго за 2019-2023 годы, был проведен анализ текущего влияния электрокаров на потребление энергии. По информации Министра транспорта Ярославской области, на конец 2023 года в регионе зарегистрировано 390 электромобилей. В разные месяцы пиковое часовое потребление энергии в области составляет 700-900 МВт\*ч. При одновременной зарядке всех электромобилей, с учетом емкости аккумулятора самой популярной в России модели – Nissan Leaf в 24 кВт\*ч, нагрузка на энергосистему составит 1 - 1,3%. Для анализа изменения доли электромобилей в структуре энергопотребления в будущем были применены технологии машинного обучения, в частности, модель Catboost, основанная на принципе градиентного бустинга. Для оценки способности выявлять, анализировать и запоминать закономерности в исследуемых данных, модель обучалась на большей доле данных и протестирована на остальной их части. Был проведен подбор параметров модели для улучшения ее способности прогнозировать, т. е. продолжать уже исследованные закономерности и сезонные тенденции в данных. По такому принципу выполнен прогноз на год вперед. Получены следующие результаты – суммарное потребление энергии выросло на 0.05% относительно 2023 года, рост за 1 квартал составил 1.15%.

Стоит отметить, что число электромобилей значительно опережает энергопотребление по темпам роста, и уже к концу 2025 года их число возрастет в 3-4 раза, а с учётом растущей ёмкости аккумуляторов новых электрокаров, создаст значительную нагрузку на энергосистему – в зимнее время от 5 до 6.5%, в летнее время от 7 до 8%.

### **Библиографический список**

1. **Российский рынок электромобилей: будущее «зеленого» автомобилестроения.**



*С.В. Гуцин, А.М. Чикалева, асп.;*  
*рук О.С. Мельникова, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ДИАГНОСТИКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Цифровая трансформация электроэнергетики требует применения современных инновационных решений, которые будут обеспечивать надежную и эффективную эксплуатацию высоковольтного оборудования Электроэнергетических систем (ЭЭС). К таким решениям можно отнести цифровые двойники, представляющие собой виртуальные модели высоковольтного оборудования, созданные на основе его реальных параметров и характеристик [1]. Их применение открывает новые возможности для обеспечения надежного и эффективного функционирования ЭЭС.

Цифровой двойник высоковольтного оборудования содержит расширенный набор данных, относящихся к конкретному функциональному узлу, в том числе информацию от автоматизированных систем диагностического мониторинга действующего оборудования.

Одной из важных особенностей цифровых двойников является возможность проведения более точной и достоверной оперативной диагностики технического состояния высоковольтного оборудования. Благодаря виртуальным моделям специалисты могут отслеживать работу оборудования в реальном времени, анализировать данные о его состоянии и прогнозировать возможные отказы [2].

Другим важным аспектом применения цифровых двойников является возможность виртуального тестирования и моделирования различных сценариев работы высоковольтного оборудования, с различным набором воздействующих факторов. Это позволит ускорить процессы поиска дефектов, совершенствовать систему планирование технического обслуживания и ремонта, на основе многопараметрической информации о техническом состоянии функциональных узлов высоковольтного оборудования. В итоге это будет способствовать переходу на риск-ориентированное управление надежностью отдельных объектов энергетики и ЭЭС в целом.

### **Библиографический список**

1. **Tao F. et al.** Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2018. – pp. 1-19.

2. **Хальясмаа, А.И. и др.** Применение технологии цифрового двойника для анализа и прогнозирования состояния трансформаторного оборудования / Хальясмаа А.И., Ревенков И.С., Сидорова А.В. // Вестник КГЭУ, Т. 14, 2022. № 3(55). – С. 99–113.

*А.С. Коломейчук, маг.;  
рук. Т.Е. Шадриков, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ 800 ВОЛЬТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ**

Современные тяговые аккумуляторы электромобилей обычно представляют собой системы с напряжением 400 В, выполненные по модульной технологии.

Однако современные производители батарей (CATL и др.) уже вовсю предлагают рынку тяговые батареи с номинальным напряжением 800 В. Для производителей переход на класс напряжения 800 В предоставляет большие возможности в создании новых моделей электромобилей. Среди преимуществ более высокое напряжение тяговой батареи гарантирует более высокую пиковую мощность зарядки, повышенную эффективность, улучшенную производительность и экономию веса компонентов электромобиля, таких как двигатели и инверторы, соединительные провода.

Были предложены три основных решения для перехода электромобилей на силовую структуру 800 В. Первый подход заключается в том, чтобы заставить всю высоковольтную систему электромобиля работать от напряжения 800 В, устраняя необходимость преобразования напряжения между компонентами.

Второй подход заключается в том, чтобы аккумулятор был подключен к 800 В, а остальная часть системы оставалась под напряжением 400 В.

Третий подход представляет собой гибридное решение, включающее в себя аккумуляторную систему, способную переключаться между напряжением 800 В при зарядке и 400 В при разрядке.

Одновременно с преимуществами архитектуры электромобилей с напряжением 800 В остается открытым вопрос переоборудования существующих и строительства новых зарядных станций.

### **Библиографический список**

1. **800-V Electric** Vehicle Powertrains: Review and Analysis of Benefits, Challenges, and Future Trends (2020) <https://ieeexplore.ieee.org/document/9294077>

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

## **РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ**

По статистическим данным процент изношенных объектов сетевой инфраструктуры в России составляет 65%. Учитывая огромную территорию России и экономическую ситуацию, необходимо поддерживать уже эксплуатируемое оборудование в хорошем состоянии.

Одним из путей повышения эксплуатационной надежности высоковольтного электроэнергетического оборудования, особенно того, что эксплуатируется за пределами нормативного срока службы, является усовершенствование существующих методов и средств контроля для получения диагностической информации, разработка математических моделей и алгоритмов оценки технического состояния электрооборудования.

Наиболее перспективным является разработка компьютерных систем технической диагностики с использованием аппарата нечеткой логики и нейронных сетей, которые способны обеспечить повышение достоверности распознавания и прогнозирования технического состояния и ресурса объекта.

Была разработана и обучена нечеткая нейронная сеть для интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов. Выполненный анализ показал, что достоверность распознавания нечетких нейронных сетей имеет ограничения, которые определяются особенностями метода ХАРГ.[1]

### **Библиографический список**

1. **Текст** научной статьи по специальности «Электротехника, электронная техника, информационные технологии»: [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-nechetkoy-neyronnoy-seti-dlya-interpretatsii-rezultatov-analiza-rastvorenykh-v-masle-gazov>.

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

## **ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ И ДИАГНОСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ**

Твердая изоляция высоковольтного оборудования играет важную роль в обеспечении надежности электроэнергетической системы. Частичные разряды непосредственно влияют на состояние электрооборудования и могут привести к его поломке.

Частичные разряды в твердых диэлектриках могут возникнуть из-за наличия полостей внутри изолятора. С помощью модели, разработанной в COMSOL, было исследовано [3] распределение электрического потенциала и электрического поля в полостях до и после возникновения ЧР, из чего были сделаны выводы о влиянии диаметра полости на величину ЧР.

На основе изучения ЧР была разработана [1] комплексная система мониторинга для высоковольтных изоляторов, позволяющая оценить техническое состояние оборудования по характеристикам мощных разрядов. Разработка включала в себя модель распространения стримеров в дефектах, изучение фазовых интервалов генерации мощных ЧР и анализ отрицательных импульсов ЧР [1].

Была разработана и проанализирована [2] математическая модель прогнозирования пробоя изоляции от воздействия ЧР на основе распределения Вейбулла для случайных величин. Подобная модель позволяет оценить остаточный ресурс материала и время до пробоя изоляции.

### **Библиографический список**

1. **Иванов, Д.А.** Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // Изв. высш. учеб. заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022.
2. **Комаров И. В. и др.** Математическая модель прогнозирования пробоя изоляции на основе характеристик частичных разрядов / Комаров И. В., Поляков Д. А., Никитин К. И., Мирошник В. Ю. // Омский научный вестник, 2021.
3. **Partial discharge measurements for investigating defected solid dielectrics** / Ahmed S. Haiba, Ain Shams University, Cairo, – Egypt, 2021.

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

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Роль электрического оборудования растет каждый год. Повышаются требования к надежности и цене.

Композитные материалы могут улучшить рабочие показатели оборудования: увеличить надежность, снизить цену в перспективе [1].

Композит – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов. На данный момент подобные материалы активно используются для конструирования ЛЭП и алюминиевых проводов [2].

ЛЭП из композитных материалов: малый вес, легкость хранения и транспортировки, легкость в обслуживании и монтаже, высокая прочность, огнестойкость, хорошие диэлектрические свойства, безопасность для автотранспорта [4]; высокая цена, маленький опыт эксплуатации, сложность молниезащиты [3].

Композитные алюминиевые провода: высокая прочность, низкая масса, высокая электропроводность [1], низкий коэффициент теплового расширения, высокая жесткость; высокая цена, сложность производства некоторых видов проводов [5]. АССР (алюминиевый композитный усиленный провод) и АССС (алюминиевый провод с композиционным сердечником).

### **Библиографический список**

1. **Яценков, А.С., Козлов, А.Н.** Использование композитных материалов в современной энергетике. Достоинства и недостатки. / Яценков А.С., Козлов А.Н. Вестник АмГУ, В.73, 2016. – С. 71-74.
2. **Шпота, А.А., Ремесник, Д.В.** Композитные опоры.
3. **Бочаров, Ю.Н., Жук, В.В.** К вопросу о композитных опорах воздушных линий // Труды Кольского научного центра РАН, 2012. – Т. 4, вып. 1.
4. **Особенности** монтажа композитных опор ВЛ [Электронный ресурс]: Монтаж и эксплуатация электрических сетей.
5. **Сильченко, Д.Г., Гришин, С.В.** Провод для воздушных линий электропередач и способ его изготовления.

*А.Е. Ставрский, студ.;*  
*рук. Ю.М. Смирнова, ст. преп.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ В ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ ГИРЛЯНДАХ

Аэродинамические изоляторы отличаются увеличенным диаметром изоляционной детали и отсутствием ребер на нижней поверхности (рис. 1, а). Изоляционная деталь большого диаметра защищает изоляторы, установленные ниже, от загрязнений и атмосферных осадков – работает как «зонтик». Маркируются аэродинамические изоляторы буквами А, АД или ВА. Например, У 120 ВА – подвесной аэродинамический изолятор с разрушающей механической нагрузкой 120 кН.



Рис. 1. Изолятор с аэродинамической изоляционной деталью  
а) внешний вид; б) комбинированная гирлянда с аэродинамическим изолятором

Аэродинамические изоляторы применяются в подвесных гирляндах с изоляторами других типов (рис. 1, б) для защиты от:

- шунтирования гирлянды изоляторов сосульками, образующимися в весенний период при таянии снега, находящегося на изоляторах и элементах опор ЛЭП;
- загрязнения гирлянды «ржавыми» стоками, образующимися во время дождя на старых ЛЭП, где нарушено антикоррозийное покрытие металлических конструкций опор;
- загрязнения гирлянды продуктами жизнедеятельности птиц с последующим ее перекрытием.

Впервые аэродинамические изоляторы были установлены в 2009 году на ВЛ 500 кВ Ирганайская ГРЭС – ПС Магнитогорская. Положительный опыт снижения аварийности на участках ВЛ с повышенным загрязнением позволил филиалу ПАО «ФСК ЕЭС» МЭС Урала в 2013 году принять решение об установке в местах наибольшего загрязнения изоляторов аэродинамического профиля вверху и в середине гирлянды.

### Библиографический список

1. **Изоляторы** стеклянные линейные подвесные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.uik.ru/> (дата обращения 10.04.2024).

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ**

В процессе эксплуатации высоковольтного электрооборудования его изоляция может расслаиваться, растрескиваться, следовательно, в изоляции появляются газовые (воздушные) включения. Электрическая прочность газового промежутка значительно меньше электрической прочности твердой изоляции и поэтому в этой области возникают частичные разряды (ЧР).

ЧР являются основной причиной старения твердой изоляции и изоляционных жидкостей. Первичными характеристиками ЧР являются напряжение возникновения (зажигания) разрядов и кажущийся заряд ЧР. По мере увеличения размеров дефектной зоны напряжение возникновения ЧР снижается, а кажущийся заряд – увеличивается. Эти параметры ЧР могут быть использованы для диагностирования изоляции высоковольтного.

Первые попытки измерения и регистрации характеристик ЧР предпринимались ещё в пятидесятых годах прошлого века, но все они оказались не успешными. Полученные результаты плохо коррелировали с реальными характеристиками изоляции и с её работоспособностью. Чаще всего отсутствие указанной корреляции объясняется влиянием электромагнитных помех на результаты измерения характеристик ЧР.

Но даже при отсутствии помех, характеристики ЧР в одном и том же газовом включении в толще твердой изоляции будут различными в серии измерений. Разброс значений напряжения возникновения разрядов и кажущегося заряда ЧР обусловлен статистическим характером образования первого эффективного электрона и изменением параметров газа (давления и температуры) во включении при предыдущих разрядах.

Исследование механизма и разброса измеряемых характеристик ЧР выполнялось на образцах изоляции с искусственными включениями. Исследуемая характеристика определялась как среднее значение контролируемого параметра по результатам множественных измерений. Полученные в процессе исследования результаты подтверждают существование монотонно изменяющейся зависимости диагностических параметров от функциональных параметров, что может быть использовано при диагностировании изоляции высоковольтного оборудования по характеристикам частичных разрядов.

*А.О. Халиман, студ.;  
рук Ю.В. Целебровский, д.т.н., проф.  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

## РАСЧЕТНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДЛИНЫ ПРОТИВОВЕСА

В [1] описан процесс создания расчётной модели в программной среде PARSIZ, описан план многофакторного вычислительного эксперимента. Анализировалось влияние факторов на максимальный продольный ток, собираемый противовесом, при прокладке его поперек вертикальной границы геоэлектрического раздела грунтов. Рассматриваемыми факторами являлись: удельное электрическое сопротивление грунта с меньшим удельным электрическим сопротивлением ( $\rho_1$ ); отношение удельных электрических сопротивлений грунтов ( $\rho_1/\rho_2$ ); длина части противовеса ( $l_1$ ), прокладываемая в грунте с  $\rho_1$ ; отношение длин частей противовеса, прокладываемых в разных по значению удельного электрического сопротивлению грунтах ( $l_1/l_2$ ); диаметр противовеса ( $d_{\text{противовеса}}$ ).

В результате, для массива результатов, был проведен корреляционный анализ для определения значимости факторов. На основании полученных данных сделан вывод о том, что наиболее весомыми факторами, влияющими на значение собираемого противовесом тока, являются отношения удельных электрических сопротивлений ( $\rho_1/\rho_2$ ) и длин частей противовеса ( $l_1/l_2$ ).

Проведен уточненный вычислительный эксперимент, в ходе которого варьировались значения лишь тех факторов, которые были признаны значимыми в результате корреляционного анализа. Результатом вычислений стало семейство кривых зависимости максимального значения тока, собираемого противовесом, от логарифма отношения  $l_1/l_2$  при разных значениях отношения  $\rho_1/\rho_2$ .

Для каждой кривой (каждого значения  $\rho_1/\rho_2$ ) было определено такое значение  $l_1/l_2$ , при котором значение продольного тока в противовесе являлось максимально возможным ( $dI_{\text{прод}}/d(\lg(l_1/l_2)) = 0$ ), выведено расчетное выражение для наиболее эффективной длины части противовеса  $l_2$ , расположенной в грунте с большим сопротивлением и зависящей от отношения удельных электрических сопротивлений грунтов.

### Библиографический список

1. Халиман, А. О. Повышение грозоупорности воздушных линий электропередачи = Increasing lightning resistance of overhead power lines / А. О. Халиман, Ю. В. Целебровский; науч. рук. Ю. В. Целебровский. Текст: непосредственный // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы 13 междунар. науч.-техн. конф., Красноярск, 23–27 окт. 2023 г.: в 2 т. – Красноярск: Сибир. федер. ун-т, 2023. – Т. 1. – С. 199 - 202.



*А.М. Чикалева, асп.;*  
*рук. О.С. Мельникова, к.т.н., доц.*  
*(ИГЭУ, Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МУЛЬТИКАМЕРНОГО РАЗРЯДНИКА**

Грозозащитные тросы с интегрированными оптоволоконными кабелями представляют собой эффективное решение для укладки цифровых коммуникаций вдоль высоковольтных линий электропередачи. Это позволяет использовать уже имеющуюся инфраструктуру энергосети и обеспечивает передачу больших объемов данных. Однако, возможно нарушение термической стойкости оптоволокна и ухудшение его производительности в случае протекания токов молнии и короткого замыкания [1]. При изолированной подвеске грозозащитных тросов с оптоволокном через изоляторы с шунтированным искровым промежутком, в процессе эксплуатации могут происходить изменения в разрядном промежутке из-за смещения электродов в плоскости, а также возможны множественные перекрытия и протекание тока короткого замыкания через грозозащитный трос с оптоволокном [2]. В этой связи, целесообразно рассмотреть применение устройства с многоэлектродной системой, построенного по принципу мультикамерного разрядника, в качестве альтернативы искровому промежутку для повышения надежности работы узла с изолированной подвеской грозозащитного троса с оптоволоконным кабелем.

Была создана имитационная модель мультикамерного разрядника с использованием программного комплекса ANSYS Maxwell, где были проведены расчеты распределения напряжения и напряженности электрического поля.

Упрощенная имитационная модель мультикамерного разрядника продемонстрировала необходимое распределение напряжения и напряженности электрического поля между различными электродами для обеспечения каскадного срабатывания. На основе проведенных исследований была определена конфигурация электродов для разработки физического прототипа мультикамерного разрядника и последующих экспериментов.

### **Библиографический список**

1. **Дмитриев, М.В., Родчихин, С.В.** Расчет термической стойкости грозозащитных тросов ВЛ 110–750 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение, 2017. – № 3(42). – С. 66–69. – EDN ZEPJLF.
2. **Ефремов, И.А., Кузьмин, А.А.** Роль грозозащитных тросов в процессах короткого замыкания // Доклады ТУСУРа, 2012, июнь. – № 1(25). – Ч. 1.

## Содержание

### Секция 13. Электрические системы

<i>Сушкова В.Р., рук. Сушков В.В.</i> Новый подход к управлению нагрузкой при недостатке мощности в энергосистеме	4
<i>Ешаев М.К., рук. Аleshин Д.А.</i> Способы регулирования тока балансировки аккумуляторных батарей	5
<i>Смазнов В.А., рук. Сушков В.В.</i> Прогнозирование электрических нагрузок и электропотребления нефтегазовых технологических комплексов с непрерывным производственным циклом	6
<i>Рафигов В.Р., рук. Мурзин А.Ю.</i> Исследование подходов к идентификации переходных параметров синхронных генераторов по данным синхронизированных векторных измерений	8
<i>Умнов Я.А., рук. Иванов И.Е.</i> Исследование динамики изменения погрешностей в расчетных выражениях ОМП на базе векторных измерений	9
<i>Пичугов И.Н., рук. Иванов И.Е.</i> Исследование переходных процессов в синхронном генераторе по различным математическим моделям	10
<i>Смирнов Э.А., рук. Иванов И.Е.</i> Исследование динамической устойчивости электроэнергетической системы с применением программного комплекса «MATLAB/SIMULINK»	11
<i>Лысов Д.А., рук. Иванов И.Е.</i> Разработка модели для определения параметров сигналов тока и напряжения при коротком замыкании на воздушной ЛЭП	12
<i>Харламова Л.А., рук. Братолобов А.А.</i> Эквивалентирование частей ЭЭС при расчетах КЗ	13
<i>Крайкина А.А., рук. Иванов И.Е.</i> Повышение информативности данных о КЗ и ОАПВ на воздушных линиях 500 кВ с применением векторных измерений	14
<i>Сорокина А.Д., рук. Иванов И.Е.</i> Исследование влияния моделей узлов генерации и нагрузки в задаче утяжеления режима ЭЭС	15
<i>Шастанов А.Д., рук. Братолобов А.А.</i> Наведенное напряжение в отключенной ВЛ по составляющим влияющего электромагнитного поля как функция режима её заземления	16
<i>Шевцова А.А., рук. Иванов И.Е.</i> Разработка алгоритма для исследования динамической устойчивости простейшей ЭЭС с моделированием АРВ сильного действия	17
<i>Шевцова А.А., рук. Иванов И.Е.</i> Разработка математической модели для автоматического расчета режима и исследования динамической устойчивости многомашинной ЭЭС	18
<i>Лялина А.А., Курносова А.Д., рук. Кормилицын Д.Н.</i> Влияние автоматического регулирования возбуждения и шунтирующих реакторов на предел передаваемой мощности и напряжения в простейшей ЭЭС	19
<i>Власова Л.В., рук. Мартиросян А.А.</i> Расчет режимов Рязанской энергосистемы при установке автотрансформатора связи на Рязанской ГРЭС	20
<i>Сметанин М.В., рук. Братолобов А.А.</i> Синхронизация управляющих воздействий по условиям динамической устойчивости ЭЭС	21

#### Секция 14. Электроснабжение

- Добренький Р.А., рук. Юренков Ю.П.* Совершенствование методики преподавания дисциплины "Автоматизация проектирования систем электроснабжения" 23
- Айзатуллин Т.А., рук. Юренков Ю.П.* Усовершенствованная методика заправки жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя 24
- Глуханец Д.Ю., рук. Бельский А.А.* Электротехнический комплекс для электроснабжения пункта телемеханики нефтепровода 25
- Кривенко Е.С., рук. Артемьева М.Л.* Подъемник на опору ЛЭП 26
- Пестерев А.А., рук. Костинский С.С.* Эмпирическая оценка относительной погрешности вычисления силы тока нулевой последовательности 27
- Пестерев А.А., рук. Костинский С.С.* Эмпирическая оценка относительной погрешности вычисления силы тока нулевой последовательности при несинусоидальной нагрузке 28
- Бабакин М.А., Изумнов Т.К., рук. Смотров Н.Н.* Применение коэффициентов использования при проектировании схем электроснабжения котельной 29
- Марков Е.В., рук. Вахнина В.В.* Разработка модели нечеткой логики по методу ИЕС 60599:2022 для определения дефектов в силовых масляных трансформаторах 30
- Самойлова А.А., Тимофеева А.Г., рук. Антонов А.А.* Применение гибридной системы накопления электроэнергии на ВИЭ в ЕЭС России 31
- Солуянов В.И.* Введение в нормативную базу удельных электрических нагрузок агломерации «г. Москва – Московская область». 32
- Кокорева А.В., рук. Сорокин А.Ф.* Снижение несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия 33
- Титов Д.В., Коломиец Я.Р., рук. Юренков Ю.П.* Модель системы электроснабжения частного дома 34
- Титов В.А., рук. Бушуева О.А.* Выявление нелегального потребления электроэнергии с использованием модели машинного обучения 35
- Титов В.А., рук. Бушуева О.А.* Разработка алгоритма выявления хищений электроэнергии при помощи интеллектуальных приборов учета электроэнергии 36
- Ткаченко С.А., рук. Сорокин А.Ф.* Внедрение системы накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,4 кВ для повышения качества электроэнергии 37
- Париков А.Н., рук. Шульпин А.А.* Введение автоматизированных систем учета электроэнергии в многоквартирных жилых домах 38
- Пучкова А.А., рук. Аржанникова А.Е.* Показатели и тенденции внедрения аморфных трансформаторов в распределительных сетях 39
- Секция 15. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем
- Полторацкий Е.Е., рук. Артемьева М.Л.* Влияние погодных условия на дистанционную защиту ЛЭП 41
- Григорьев Д.Г., рук. Лебедев В.Д.* Анализ погрешностей, возникающих при определении вектора тока 42

<i>Галанин И.А., рук. Шадрикова Т.Ю.</i> Разработка модели сети 6-10кВ для обучения метода определения места повреждения на основе нейронных сетей	43
<i>Зверев А.А., рук. Воробьева Е.А.</i> Моделирование управляемых шунтирующих реакторов при расчетах токов короткого замыкания	44
<i>Шарыгин Д.С., рук. Филатова Г.А.</i> Исследование алгоритмов определения места повреждения по параметрам аварийного режима	45
<i>Романов Л.Р., рук. Крюков О.В.</i> Перспективные подходы к моделированию комплексов релейной защиты и автоматики	46
<i>Алёшин К.С., Сёмушкин А.А., рук. Шуин В.А.</i> Общие требования и структура универсальной многофункциональной централизованной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ	47
<i>Алёшин К.С., Сёмушкин А.А., рук. Шуин В.А.</i> Имитационная модель генератора для исследования напряжения третьей гармоники обмотки статора	48
<i>Алёшин К.С., Сёмушкин А.А., рук. Шуин В.А.</i> Защита ротора от замыканий на землю на основе наложения прямоугольных импульсов напряжения	49
<i>Айсин Р.Д., рук. Вихарев Д.Ю., Родин Н.А.</i> Особенности расчёта токов короткого замыкания за питающими трансформаторами с устройством регулирования под нагрузкой	50
<i>Антонов А.Н., рук. Кутумов Ю.Д., Лебедев В.Д.</i> Аппроксимация емкостных характеристик силовых трансформаторов для повышения эффективности защиты блока «генератор-трансформатор» от однофазных замыканий на землю	51
<i>Евдаков А.Н., рук. Филатова Г.А.</i> Подготовка публичной базы реальных осциллограмм различных событий в электроэнергетических сетях	52
<i>Антонов А.Н., рук. Кутумов Ю.Д., Лебедев В.Д.</i> Разработка имитационной модели для исследования процессов при однофазном АПВ в сетях сверхвысокого напряжения	53
<i>Бабырь К.В., Устинов Д.А., рук. Устинов Д.А.</i> Разработка защиты от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах напряжением 6-10 кВ на основе параметров обратной последовательности	54
<i>Двойненко М.В., рук. Шуин В.А.</i> Моделирование алгоритма расчёта междуфазных и фазных сопротивлений в устройствах защиты серии «Сириус»	56
<i>Галанин И.А., рук. Шадрикова Т.Ю.</i> Особенности применения нейронных сетей для защиты и определения места повреждения	57
<i>Новиков В.И., Киселев Д.А., рук. Алексинский С.О.</i> Исследование схемы симметрирования преобразователя трёхфазной системы в однофазную	58
<i>Вихарев Д.Ю., рук. Мурзин А.Ю., Родин Н.А.</i> Определение факта насыщения электромагнитных трансформаторов тока на основе непрерывного измерения индуктивности цепи намагничивания	59
<i>Дербенев С.Л., Двойненко М.В., рук. Шуин В.А.</i> Анализ методик определения параметров режима самозапуска электродвигателей	60
<i>Шустров А.В., Зверев А.А., рук. Савельев В.А.</i> Интеллектуальная система релейной защиты и автоматики	61

*Вихарев Д.Ю., рук. Мурзин А.Ю., Родин Н.А.* Математическая модель кабельной линии на основе применения векторного потенциала магнитного поля

62

#### Секция 16. Электротехника и электротехнологии

*Серуков П.С., рук. Голубев А.Н.* Расчет и моделирование установки индукционной закалки

64

*Романов А.А., рук. Долгих И.Ю.* Моделирование электротепловых процессов индукционного нагрева стальных труб при стыковой сварке

65

*Шамров Д.Д., рук. Сайкин М.С.* Численное исследование магнитоэлектронного герметизатора вакуумной камеры установки электронно-лучевой сварки ЭЛУ-21

66

*Яцына Ю.В., рук. Баженов В.С.* Расчет узлов оборудования контактно-стыковой сварки

67

*Смирнов Д.С., рук. Карачёв В.Д.* Моделирование корректора коэффициента мощности источника питания аргодуговой сварки

68

*Петухов Н.М., рук. Храмов А.Е.* Разработка активного корректора коэффициента мощности

69

*Новоселов Д.В., рук. Макаров А.В.* Разработка микропроцессорного управления установки охлаждения сварочного инвертора

70

*Чугров А.А., рук. Храмов А.Е.* Разработка однофазного активного выпрямителя напряжения

71

*Чернышов М.И., рук. Чекан Г.В.* Оценка надежности электротехнологической установки для нагрева металла

72

*Подунай С.В., рук. Савенко А.Е.* Автоматическая система гашения колебаний груза с использованием визуального контроля в крановых механизмах

73

*Пантелеев С.В., Менжинский А.Б., Малашин А.Н.* Методика оптимального проектирования синхронного генератора с трапецеидальной ЭДС

74

*Бармина А.И.* Анализ конструкций жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей

75

*Давыдова Д.Д., рук. Савенко А. Е.* Применение волновых электростанций в Черном море

76

#### Секция 17. Электроэнергетика: прошлое, настоящее, будущее

*Афанасьев А.К., рук. Бушуева О.А.* Перспективное развитие схемы электрической сети района костромской энергосистемы

78

*Горбашкова М.С., рук. Сорокин А.Ф., Бушуева О.А.* Влияние высших гармоник на системы электроснабжения

79

*Губернаторова В.С., рук. Аржанникова А.Е., Бушуева О.А.* Инновационная система напряжения 0,95 кВ

80

*Исаков Е.М., Пискунов Д.В., рук. Филатова Г.А.* Исследование цифровых измерительных трансформаторов в режимах однофазных замыканий на землю

81

*Киселёва А.С., рук. Бушуева О.А.* Системы электроснабжения с распределенной генерацией

82

<i>Мольков В. А., рук. Суслов. К. В.</i> Актуальность развития гибридных комплексов ВИЭСНЭЭ	83
<i>Суслов А.К, Кизян Е.А., рук. Суслов. К. В.</i> Энергоснабжение изолированных и труднодоступных территорий России: проблемы и тенденции	84
<i>Троханов Д.А., рук. Бушуева О.А.</i> Качество электроэнергии в системах электроснабжения различных групп потребителей	88
<i>Фокин М. И., рук. Бушуева О.А.</i> Опыт применения систем накопления электроэнергии на объектах ПАО «РОССЕТИ»	89

Секция 18. Электрооборудование и режимы  
электрических станций и подстанций

<i>Алтухов М.Ю., рук. Новоселов Е.М.</i> Моделирование межвитковых замыканий в обмотке статора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций	91
<i>Баркалов Д.Д., рук. Лхамдондог А.</i> Оценка воздействия бросков намагничивающих токов на параметры силовых трансформаторов	92
<i>Власов М.В., рук. Страхов А.С.</i> Выявление повышенного динамического эксцентриситета на основе анализа спектров сигналов асинхронных двигателей	93
<i>Гаврилов Д.Н., Говоров Д.А., рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка методических указаний по изучению системы постоянного оперативного тока	94
<i>Глазков О.А., рук. Скоробогатов А.А.</i> Разработка лабораторного стенда для анализа и диагностики межвитковых замыканий в асинхронных двигателях	95
<i>Ковалева К.С., Ким А.Д., рук. Лхамдондог А.</i> Оценка воздействия геомагнитных возмущений на работу силового трансформатора	96
<i>Кочаров Б.Э., рук. Батаева В.В.</i> Анализ основных причин неисправностей силовых трансформаторов 35-500 кВ	97
<i>Кравченко И.В., рук. Новоселов Е.М.</i> Investigation of the effect of mechanical defects on the stator current of an asynchronous electric motor	98
<i>Мавлиханова Д.Д., рук. Лапшин В.М.</i> Допустимые перегрузки силовых трансформаторов с учетом срока службы и технического состояния	99
<i>Макаров К.Ю., рук. Лхамдондог А.</i> Оценка влияния параметров вторичных цепей трансформатора тока на процессы насыщения при коротких замыканиях	100
<i>Мирохватов Д.А., Рождественская Е.А., рук. Скоробогатов А.А.</i> Исследование влияния межвитковых замыканий на ток статора асинхронного электродвигателя	101
<i>Отрода А.В., рук. Страхов А.С.</i> Применение преобразования гильберта в целях диагностики асинхронных двигателей	102
<i>Подшивалов Е.С., Сергеев П.С., рук. Крюков О.В.</i> Совершенствование алгоритма работы гибридного накопителя электроэнергии	103
<i>Пырин Д.С., рук. Лапшин В.М.</i> Использование урв при кз в присоединениях 6 кв собственных нужд электростанций	104
<i>Рождественский П.А., рук. Страхов А.С.</i> Исследование спектров сигналов асинхронного двигателя со статическим эксцентриситетом	105

<i>Смирнов Д. В., рук. Т.Н. Шмелева, Новоселов Е.М.</i> The effects of mechanical defects on the external magnetic field of an asynchronous motor	106
<i>Смирнов Г.Д., ру. И.Н. Сулыненков</i> Разработка алгоритма для автоматизации расчетов надежности схем распределительных устройств	107
Секция 19. Высоковольтная электроэнергетика и электротехника	
<i>Баранов А.Е., рук. Вихарев А.В.</i> Оптимизация формы полимерных штыревых изоляторов;	109
<i>Воронов А.В., рук. Словесный С.А.</i> Анализ эффективных и мало затратных мероприятий по укреплению железобетонных опор и конструкций, установленных в вечно мерзлых и нестабильных грунтах опор лэп 35-110 кВ	110
<i>Гладышев А.А., рук. Шадриков Т.Е.</i> Использование машинного обучения в задаче прогнозирования роста потребления энергии электромобилей	111
<i>Гладышев А.А., рук. Шадриков Т.Е.</i> Влияние электромобилей на развитие энергосистем в РФ	112
<i>Гущин С.В., Чикалева А.М., рук. Мельникова О.С.</i> Анализ возможности применения цифровых двойников в диагностике высоковольтного оборудования	113
<i>Коломейчук А.С., рук. Шадриков Т.Е.</i> Использование напряжения 800 Вольт в электрическом транспорте	114
<i>Коломейчук А.С., рук. Шадриков Т.Е.</i> Разработка нечеткой нейронной сети для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов	115
<i>Крицын И.А., рук. Шадриков Т.Е.</i> Частичные разряды в твердой изоляции и диагностика оборудования на их основе	116
<i>Крицын И.А., рук. Словесный С.А., Савельев В.А.</i> Использование композитных материалов для улучшения качества электрического оборудования	117
<i>Ставровский А.Е., рук. Смирнова Ю.М.</i> Опыт использования аэродинамических изоляторов в подвесных гирляндах	118
<i>Уваров Д.А., рук. Словесный С.А.</i> Моделирование дефектов изоляции при исследовании процессов электрического старения	119
<i>Халиман А.О., рук. Целебровский Ю.В.</i> Расчетное выражение для определения эффективной длины противовеса	120
<i>Чикалева А.М., рук. Мельникова О.С.</i> Разработка и исследование имитационной модели мультикамерного разрядника	121

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
«ЭНЕРГИЯ-2024»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

*Составители: Макаров А.В., Шадриков Т.Е.  
Компьютерная верстка Дыдыкиной Н.Н.  
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.  
Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,94.  
Тираж 100 экз. Заказ № .  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический  
университет им. В.И. Ленина»  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ