



ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЭНЕРГИЯ-2016

ОДИННАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

5-7 апреля 2016 г.
г. Иваново

ТОМ 3

Посвящается светлой памяти В.Ф. Воробьева

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУВО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина»
Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук
Российский национальный комитет СИГРЭ (Молодежная секция)
Академия электротехнических наук РФ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2016»

ОДИННАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ИВАНОВО, 5 – 7 апреля 2016 г.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 3

ИВАНОВО

ИГЭУ

2016

УДК 620 + 621

ББК 31

Э 45

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – 298 с.

ISBN 978-5-00062-158-5

ISBN 978-5-00062-163-9

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: проректор по научной работе, д.т.н., проф. **В.В. ТЮТИКОВ**.

Заместитель председателя: начальник управления НИРС и ТМ, к.т.н., доцент **Макаров А.В.**

Члены оргкомитета: декан электроэнергетического факультета, к.т.н., профессор **А.Ф. СОРОКИН**, зав. кафедрой «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», к.т.н., доцент **В.Д. ЛЕБЕДЕВ**, зав. кафедрой «Теоретические основы электротехники и электротехнологий», д.т.н., профессор **В.А. МАРТЫНОВ**, заместитель зав. кафедрой «Электрические станции и диагностика электрооборудования», к.т.н., доцент **В.М. ЛАПШИН**, зав. кафедрой «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика», к.т.н., доцент **В.Ф. ВОРОБЬЕВ**, зав. кафедрой «Электрические системы», к.т.н., доцент **А.Ю. МУРЗИН**.

СЕКЦИЯ 12

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Председатель – к.т.н., доцент **Мурзин А.Ю.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Москвин И.А.**

А.Н. Рожков, асп.;
рук. Д.И. Панфилов, д.т.н., проф.,
М.А. Новиков, к.т.н.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОМ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КОММУТАТОРОМ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Современному состоянию энергосистемы России характерно наличие ряда проблем, связанных с транспортировкой электроэнергии, в том числе характерны проблемы перегрузки имеющихся линий электропередач, ограничения пропускной способности межсистемных и системообразующих связей, неоптимальное распределение потоков мощности по параллельным линиям различного класса напряжений. Технологии гибких линий электропередач (*FACTS*) позволяют решать имеющиеся на сегодняшний день проблемы в энергосистеме. Одними из устройств, осуществляющими технологию *FACTS*, являются фазоворотные устройства (ФПУ).

ФПУ являются эффективными устройствами, с помощью которых можно регулировать потоки мощности в энергосистеме [1]. Применение полупроводниковых коммутаторов в составе ФПУ позволяет реализовать управляемые воздействия на энергосистему при различных режимах работы энергосистемы. В работе предложен способ реализации управления параметрами установившегося режима энергосистемы, основанный на использовании ФПУ с полупроводниковым коммутатором [2].

Разработан регулятор ФПУ и проведён анализ структуры построения его программно-аппаратного обеспечения, входящего в систему управления ФПУ. Рассмотрено применение ФПУ в условиях установившегося режима работы энергосистемы при различных сценариях работы его регулятора:

- а) перераспределение потоков мощности в энергосистеме;
- б) ограничение тока в линии;
- в) минимизация потерь в выбранных линиях электропередачи.

Проведен анализ структур построения и алгоритмов работы функциональных блоков регулятора, формирующих управляющие воздействия на ФПУ для реализации соответствующих режимов работы: перераспределения потоков мощности в энергосистеме реализуется под внешним управлением ФПУ; режим ограничения тока реализуется специальным функциональным блоком регулятора, использующим двухмашинную модель энергосистемы и адаптивный алгоритм управления; формирование управляющих воздействий на ФПУ для реализации режима минимизации потерь основывается на использовании таблиц.

Предложена модель ФПУ с полупроводниковым коммутатором и системой управления, интегрированная в 39-ти шинную IEEE модель энергосистемы [3], объединяющую 10 генераторов и 22 потребителя энергии. В дальнейшем расчет установившихся режимов работы энергосистемы при различных управляющих воздействиях проводился в среде PSCAD. Рассчитаны управляющие воздействия регулятора для реализации требуемых режимов работы.

Проведен расчет режимов работы 39-ти шинной модели энергосистемы в среде RastrWin при соответствующих заданных управляющих воздействиях на ФПУ. Совпадение режимов работы энергосистемы, рассчитанных в разных средах моделирования, подтвердило работоспособность разработанной структуры регулятора ФПУ и его функциональных блоков, что позволяет эффективно применить разработанные алгоритмы для управляемых воздействий на энергосистему, с помощью ФПУ, в установившихся режимах работы энергосистемы. Дальнейшие исследования будут посвящены разработке алгоритмов работы и функциональных блоков регулятора в условиях переходного режима энергосистемы.

Библиографический список

1. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазопоротными устройствами (ч. 1) // Электричество. – 2014. – № 7. – С. 16 – 25
2. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н. Фазопоротные устройства с тиристорным управлением // Электротехника. – 2014. – № 1.
3. <http://sys.elec.kitami-it.ac.jp/ueda/demo/WebPF/39-New-England.pdf>.

А.И. Биалова, асп.;
рук. В.И. Доманов, к.т.н., зав. кафедрой
(УлГТУ, г. Ульяновск)

ПРОГНОЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В Г. УЛЬЯНОВСК

Переход к рыночным принципам взаимоотношений между потребителями электроэнергии и энергосистемой повышает требования к точности

прогнозирования электропотребления, как для отдельных предприятий, так и для энергосистемы и ответственность за решения, принятые на основе прогнозирования.

С 1 сентября 2006 года запущен реальный конкурентный сектор рынка, где цена на электроэнергию формируется на основе спроса и предложения. Правовой основой организации функционирования и развития новой модели оптового рынка электроэнергии и мощности (НОРЭМ) является Постановление Правительства от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности».

Основной задачей субъектов НОРЭМ является обеспечение соблюдения технологических требований по надежному функционированию единой ЭЭС. Оно включает в себя поддержание установленных нормативов качества электроэнергии в нормальном режиме работы, сохранение устойчивости параллельной работы и надежности электроснабжения потребителей в утяжеленных режимах, устранение аварийных нарушений, восстановление нормального режима и быструю ликвидацию аварийного режима, предотвращение каскадного развития аварийных нарушений.

Одним из важнейших показателей при планировании является уровень ожидаемого электропотребления в целом по энергообъединению и группам. Необходимость точного прогнозирования потребления электроэнергии обусловлена технологическими и экономическими причинами. Заниженный прогноз приводит к необходимости использования дорогостоящего аварийного оборудования. Завышенное предсказание приводит к увеличению издержек на поддержание в рабочем состоянии излишних резервных мощностей [1, 2].

Точность прогнозирования напрямую зависит от методик расчета. Существует большое количество моделей и методов краткосрочного и долгосрочного прогнозирования нагрузки, каждая из которых имеет определенные достоинства и недостатки [3].

В данной работе проанализирована ошибка прогнозирования в зависимости от объема и состава исходной информации. Для построения прогнозных значений были исследованы данные, накопленные в МУП «Ульяновская городская электросеть» за три года [4]. Исходной информацией для составления прогноза потребления электроэнергии могут выступать:

- предшествующие значения прогнозируемой величины x_1 ;
- предшествующие значения величин (x_i), связанных технически с переменной x_1 .

Оценка прогноза включает в себя нахождение различных ошибок (относительной, средневзвешенной по модулю и максимальной), которые определяются техническими особенностями прогнозируемой величины.

На основе проведенных исследований можно сказать, что увеличение исходной информации снижает ошибку прогноза, среднее значение ошибки при прогнозировании только по исходным данным энергопотребления практически не изменяется от объема потребления, среднее значение ошибки при прогнозировании с увеличенной исходной информацией уменьшается и снижается с ростом объема потребления, потребление электроэнергии достаточно жестко коррелируется с температурой и влажностью.

Библиографический список

1. **Седов А.В.** Системы контроля, распознавания и прогнозирования электропотребления: модели, методы, алгоритмы и средства / А.В. Седов, И.И. Надтока. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 2002. – 320 с.
2. **Шнейдер А.М.** Суточное прогнозирование нагрузки ЭЭС с учетом прогнозов температуры / А.М. Шнейдер, Т. Тканева, Д.А. Шиффман / Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 260 с.
3. **Кендалл М.,** Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды / Пер.с англ. – М.: Наука, 1976. – 540 с.
4. **Билалова, А.И.** Анализ прогнозирования энергопотребления с различными информационными базами / А.И. Билалова, В.И. Доманов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук: темат. сб. науч. тр. – Самара, 2014. –Т. 16. – №4 (3). – С. 535 – 537.

Д.Н. Седойкин, асп.;
рук. А.А. Юрганов, д.т.н., проф.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург, ООО НПП "ЭКРА", г. Чебоксары)

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО АППРОКСИМАТОРА

Все существующие системы автоматического регулирования возбуждения имеют жёсткий детерминированный алгоритм регулирования. При жёсткой структуре приходится выбирать некую компромиссную настройку автоматического регулятора возбуждения (АРВ), обеспечивающую удовлетворительное или приемлемое качество регулирования для большинства режимов. Для решения задачи по обеспечению наилучшего качества регулирования и стабилизации при всех схемно-режимных си-

туациях потребуется автоматическое изменение настроек по каналам стабилизации, т.е. необходимо применение адаптивных систем управления [1].

Согласно методу эквивалентирования [3], внешнюю по отношению к генератору сеть можно без потери информативности заменить эквивалентной схемой «генератор – линия – шины бесконечной мощности».

В этом случае адаптивное управление возбуждением синхронного генератора сводится к решению следующей задачи: как должны изменяться коэффициенты каналов стабилизации при изменении параметров схемы и коэффициента усиления регулятора напряжения, чтобы переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействиям носили бы аperiodический или монотонный характер.

На основе теоремы FAT (Fuzzy Approximation Theorem), согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике [7], разработана методика синтеза нечеткого аппроксиматора, определяющего оптимальные коэффициенты усиления каналов стабилизации в зависимости от параметров регулятора напряжения, генератора и эквивалентного внешнего индуктивного. Приведен пример разработки нечеткого аппроксиматора и проведена оценка эффективности расчета коэффициентов каналов стабилизации для нескольких электроэнергетических систем с различными типами генераторов.

Новый метод определения оптимальных коэффициентов каналов стабилизации позволяет адаптировать систему автоматического управления возбуждением не только к изменению схемно-режимных условий работы генератора с сохранением заданного качества переходных процессов, но и решает задачу автоматизированного расчета коэффициентов усиления АРВ различных типов синхронных генераторов.

Библиографический список

1. **Кичаев В.В.**, Юрганов А.А. Современное состояние проблемы регулирования возбуждения синхронных машин. – ФГУП НИИЭлектромаш.
2. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Под ред. Егупова Н.Д. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 744 с.
3. **Юрганов А.А.**, Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.
4. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
5. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
6. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
7. **Круглов В.В.**, Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.

*В.Ю. Вуколов, к.т.н.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород)*

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6 – 35 КВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

К настоящему времени около 70 % воздушных линий (1500 тыс. км) и трансформаторных подстанций 6 – 35 кВ (500 тыс. шт.) отработали свой нормативный срок. В текущей ситуации это приводит к резкому снижению надежности электроснабжения потребителей ввиду роста отказов элементов электрических сетей. Существующая статистика наблюдений за объектами электросетевого хозяйства показала увеличение unplanned отключений потребителей при изменении погодных условий, тем самым подтверждающая вывод о неудовлетворительном состоянии оборудования, находящегося в эксплуатации. Снижение надежности электроснабжения приводит также к росту потерь электрической энергии. Так, в распределительных сетях их относительная величина достигла 14 %, а в ряде энергосистем 15 % и более.

Следовательно, требуется разработка таких мероприятий по увеличению надежности распределительных электрических сетей, которые позволят при минимальных затратах обеспечить снижение unplanned отключений потребителей, уменьшить время восстановления электроснабжения после аварий и снизить интенсивность отказов электрооборудования. Указанная задача должна решаться в условиях повышения энергоэффективности передачи электроэнергии в рамках приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ [1].

Зарубежный опыт обеспечения надежности электроснабжения потребителей основан на создании больших резервов генерирующих мощностей (до 40 – 50 % от максимума нагрузки энергосистемы, в РФ не более 10 %) и интеграции в сеть альтернативных источников энергии. Для повышения схемной надежности путем автоматического включения объектов малой генерации и создания устройств определения мест повреждения (ОМП) линий электропередачи (ЛЭП), используются блоки синхронизированных измерений (PMU). Применение PMU позволяет рассматривать динамические процессы изменения нагрузок и перетоков мощности в элементах распределительных электрических сетей и внедрять автоматизированную систему управления коммутационной аппаратурой.

Отечественный опыт использования синхронизированных измерений параметров режима ограничен электрическими сетями напряжением

220 кВ и выше, в которых они применяются для повышения устойчивости энергосистемы и контроля основных параметров режима. Для обеспечения надежности электроснабжения потребителей в распределительных электрических сетях путем управления режимами электропередачи в российской и зарубежной практике устройства РМУ не рассматривались. Такая задача решалась путем замены отработавшего свой ресурс или аварийно вышедшего из работы оборудования на современное, обладающего более высокими показателями безотказности. Кроме того, активное развитие получило внедрение устройств диагностики состояния оборудования, например приборов для ОМП, регистраторов аварийных событий, современных электронных счетчиков с памятью и возможностью дистанционной передачи данных. Использование синхронизированных векторных измерений в разных точках сети расширяет функции диагностики состояния оборудования и позволит реализовать возможность управления конфигурацией и режимом распределительных сетей путем разработки и внедрения специальных контроллеров или устройств РМУ.

Проведенное исследование для распределительных электрических сетей г. Выкса Нижегородской области позволяет оценить изменение ключевых показателей надежности. Так, на настоящий момент в распределительных электрических сетях, состоящих из 200 км линий электропередачи 6 – 35 кВ, 150 трансформаторных подстанций, осуществляющих электроснабжение потребителей преимущественно второй и третьей категории, за год происходит в среднем 17 отказов, среднее время восстановления электроснабжения после отключения составляет 1 час, время обнаружения места повреждения и устранение на ЛЭП составляет от 6 до 24 часов. Внедрение предлагаемых мероприятий, согласно проведенным расчетом позволит сократить число отключений на 20 – 25 %, снизить время восстановления электроснабжения потребителей за счет автоматических дистанционных переключений в сети до 1 мин, сократить зону обхода ЛЭП для определения повреждения не менее чем в 2 раза.

Выводы. Реализация программных средств интеллектуального анализа синхронизированных измерений и управления режимом электрической сети позволит добиться повышения надежности электроснабжения потребителей и снижения потерь электроэнергии в сети.

Библиографический список

1. **Вуколов В.Ю.** Повышение эффективности передачи электроэнергии в распределительных сетях. Ч. 1 / В.Ю. Вуколов, А.Л. Куликов, Б.В. Папков // М.: НТФ «Энергопрогресс», Библиотека электротехника, 2013. – № 11. – 72 с.

*Н.Ю. Филимонов, студ.;
рук. А.А. Юрганов, д.т.н., проф.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)*

ПОЛНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ АРВ-РЭМ 700

Системы возбуждения и их автоматические регуляторы (АРВ) играют важную роль в обеспечении устойчивости параллельной работы электроэнергетической системы. Они позволяют поддерживать напряжение на заданном уровне, обеспечить наиболее качественный переходный процесс при изменении режима работы, осуществить наиболее интенсивное демпфирование послеаварийных качаний. В настоящее время осуществляется перевод всех регуляторов с аналоговой базы на цифровую. Современные цифровые АРВ обладают высокой вычислительной способностью и позволяют реализовать сложные алгоритмы в различных режимах работы генератора.

Основными разработчиками АРВ в РФ являются ОАО «Силовые машины» и ЗАО НПП «Русэлпром-Электромаш». Выпускаемые ими серии регуляторов типа АРВ-М и АРВ-РЭМ, соответственно, имеют одинаковые алгоритмы основных каналов регулирования и стабилизаторов режима, но отличаются способами реализации защитных и технологических функций. Эти особенности целесообразно учитывать при расчете переходных процессов и прогнозировании оптимальной настройки АРВ в реальных условиях электростанций. В докладе описана подробная математическая модель регулятора типа РЭМ-700, работающего в эквивалентной системе, изображённой на рис. 1, отражающей поведение синхронного генератора при работе в реальной сложной сети. При этом внешняя сеть эквивалентруется в соответствии с разработанной методикой [1].

Математическое описание АРВ традиционно представляется в виде непрерывных передаточных функций. Как показывает практика, работа реальных цифровых регуляторов отличается от работы математических моделей, представленных в виде непрерывных передаточных функций [2]. Проблема заключается в осуществлении билинейного преобразования при переходе в цифровую форму, которое искажает характеристики исходных передаточных функций, тем самым изменяя характер протекания переходных процессов.

Часто при моделировании используют упрощённую форму АРВ, состоящую из ПИД-канала регулирования по отклонению напряжения, стабилизаторов внутреннего и внешнего движения. Если такая детализация

приемлема для сетевых расчётов, то она является недостаточной для осуществления комплексной настройки АРВ. Перечисленные выше каналы образуют регулятор напряжения. Помимо регулятора напряжения существует регулятор тока и ограничитель минимального возбуждения, осуществляющие ПИ-регулирование по току и реактивной мощности соответственно. Выбор активного регулятора осуществляется программным селектором.

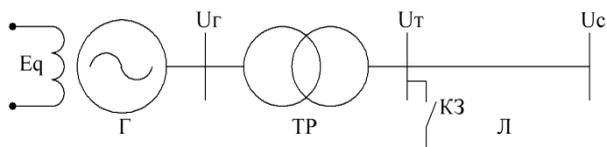


Рис. 1. Эквивалентная схема для исследования переходных процессов

На рис. 2 показаны графики синхронной ЭДС при представлении регулятора упрощённой и полной моделью. Наблюдается расхождение в работе, поэтому для наиболее достоверного воспроизведения переходных режимов и осуществления комплексной настройки необходимо выполнять полную модель АРВ в дискретной форме с учётом логики программного селектора.

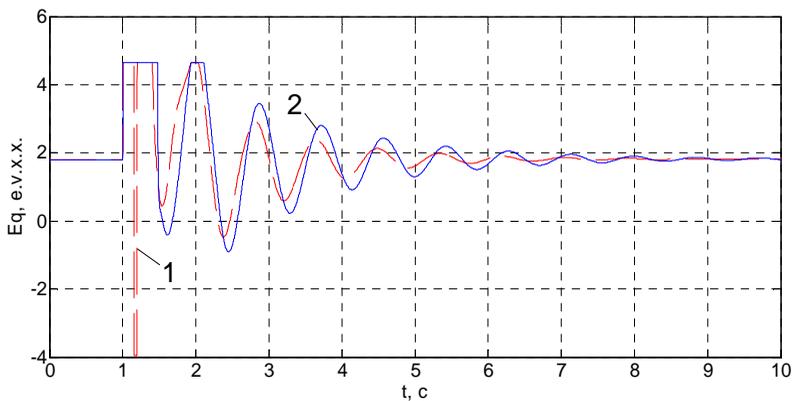


Рис. 2. Синхронная ЭДС при трёхфазном КЗ за блочным трансформатором длительностью 0,15 с при регулировании возбуждения: 1 – Упрощённой моделью АРВ; 2 – Полной моделью АРВ

Библиографический список

1. Юрганов А.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А.А. Юрганов, В.А. Кожевников. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.

2. Тимощенко К.П. Разработка алгоритмов автоматизированного цифроаналогового стенда для испытаний систем возбуждения электротехнических комплексов: дис. канд. техн. наук / К.П. Тимощенко; Национальный минерально-сырьевой университет "Горный". СПб, 2014. – 141 с.

*В.А. Попов, Д.И. Родэ;
рук. Л.В. Толстихина, к.т.н., доц.*

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЭС

В современной гидроэнергетике актуальными являются задачи рационального использования водных ресурсов водохранилища. Наиболее распространенная задача – это задача оптимизации режимов нагрузки ГЭС.

При расчете оптимального режима ГЭС был использован метод неопределенных множителей Лагранжа [1].

В данном примере рассматривались три ГЭС: Пинежская, Верхнесвирская, Кривопорожская, с номинальными мощностями (P) соответственно: $P_1 = 110$ МВт, $P_2 = 180$ МВт, $P_3 = 160$ МВт. Пинежская ГЭС является балансирующей.

Расходные характеристики для станций Пинежская, Верхнесвирской и Кривопорожской определим в соответствии с [2].

В результате аппроксимации расходных характеристик (Q) получаем уравнения второго порядка для Пинежской, Кривопорожской и Верхнесвирской ГЭС соответственно:

$$Q_1 = 0,001 \cdot P^2 + 3,308 \cdot P + 114,8; \quad (1)$$

$$Q_2 = 0,003 \cdot P^2 + 3,283 \cdot P + 52,3; \quad (2)$$

$$Q_3 = 0,0077 \cdot P^2 + 5,488 \cdot P + 131,8. \quad (3)$$

Величина нагрузки $P_n = 450$ МВт.

Условия оптимального режима получим из [1].

$$0,001 \cdot P^2 + 3,308 \cdot P + 114,8 = 0,003 \cdot P^2 + 3,283 \cdot P + 52,3 = 0,0077 \cdot P^2 + 5,488 \cdot P + 131,8. \quad (4)$$

Решаем совместно уравнения. Для решения полученной системы уравнений используется метод Ньютона [3].

Из решения данной системы уравнений найдем $P_1 = 176,5$ МВт; $P_2 = 177,5$ МВт; $P_3 = 96$ МВт.

Проведем расчет потери мощности в сети до и после оптимизации.

Суммарные потери (ΔP) до и после оптимизации соответственно составят:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 10,72 \text{ МВт.} \quad (5)$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 9,86 \text{ МВт.} \quad (6)$$

Снижение потерь в сети в результате оптимизационных мероприятий составит:

$$\Delta P_{\text{до}} - \Delta P_{\text{после}} = 10,72 - 9,86 = 0,86 \text{ МВт.} \quad (7)$$

Прогнозируемую себестоимость электроэнергии за 1 МВт. ч. определим по Единым сценарным условиям ОАО «РусГидро» [4].

Произведем расчет прогнозируемой экономии средств с 2015 на следующие 10 лет рис. 1.

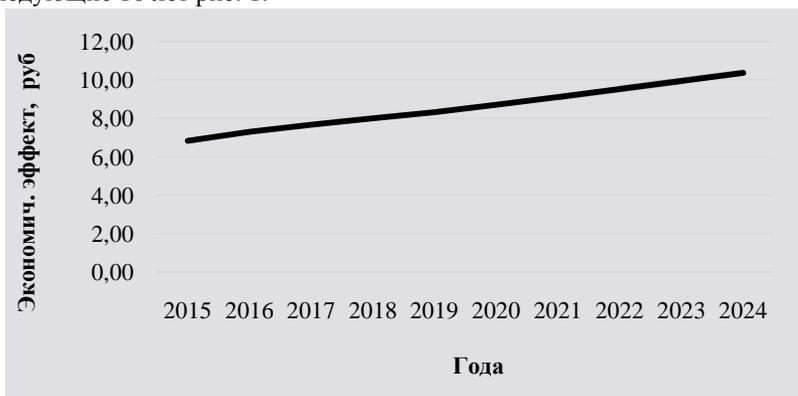


Рис. 1. Прогнозируемый экономический эффект от оптимизации с 2015 по 2024 гг.

Вывод. Прогнозируемая экономия денежных средств изменяется от 6,83 млн. руб. до 10,35 млн. руб. ежегодно. Расчет был произведен для двух существующих и одной проектируемой ГЭС. Данный метод применим для любого количества ГЭС и сети любой конфигурации.

Библиографический список

1. **Электроэнергетические** системы в примерах и иллюстрациях // В.А. Венников, Ю.Н. Астахов, В.В. Ежков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983.– 683 с.
2. **Филипова, Т.А.** Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1975. – 364 с.
3. **Вержицкий В.М.** Численные методы. (линейная алгебра и нелинейные уравнения).– М.: Высшая школа, 2000. – 266 с.
4. **Единые** сценарные условия ОАО «РусГидро» на 2012 – 2037 гг.: приказ ОАО «РусГидро» от 30.01.12 г. №62. – М., 2015. – 22 с.
5. **Бердышев В.И.,** Летун В.М., Волкова Т.В., Глуз И.С. Математическое моделирование: оптимизация режимов работы тепловых электростанций // Вестник Уральского отделения РАН. – 2013. – № 1. – С. 25 – 33.

*Е.А. Разуеи, асп., В.В. Федчиин, к.т.н.;
рук. Г.С. Кудряшев, д.т.н., проф.
(ИРНТУ, г. Иркутск)*

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Одной из важных характеристик линии электропередачи является допустимая токовая нагрузка, которая является результатом измерения величины силы электрического тока, протекающего по линии электропередачи при конкретных климатических условиях окружающей среды [1].

Соответственно, необходима технология более точного определения, в частности полного сопротивления линий электропередачи в реальном времени, позволяющая проводить точную оценку свойств линии электропередачи (таких как допустимая токовая нагрузка). Это обеспечит многие преимущества, включающие в себя более эффективное использование линий электропередачи, а также определение обрывов и определение стабильности линии электропередачи.

Рассмотрим динамику изменения среднегодовой температуры в разных регионах страны. Среднегодовая температура в Москве с 1937 г. по 2010 г. и изменения активного сопротивления на протяжении данного периода представлена на рис. 1.

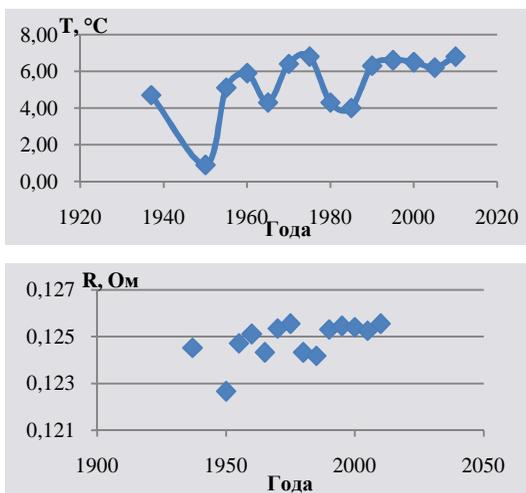


Рис. 1. График изменения среднегодовой температуры и активного сопротивления в г. Москве с 1937 г. по 2010 г.

Расчет проводился для воздушной линии, без грозозащитного троса. Напряжение ЛЭП 220 кВ и протяженностью 262 км. На ВЛ используется сталеалюминовый провод сечением 240 мм² марки АС 240/39.

На графиках видно, что среднегодовая температура в рассматриваемом периоде времени имела не постоянное значение. Зафиксировано как резкое увеличение температурного показателя, так и резкое понижение. Изменение температуры повлияло на режим работы линии электропередач, т.к. активное сопротивление линии менялось в зависимости от изменения температурного показателя, а следовательно и изменялось полное сопротивление воздушной линии. При увеличении активного сопротивления, увеличивались потери активной энергии на нагрев провода, увеличивалось расстояние между фазными проводами и землей, тем самым вносилась погрешность в определении емкостной проводимости воздушной линии. При наличии на ВЛ грозозащитного троса, при изменении температуры расстояние между тросом и фазными проводами изменяется, это обуславливается тем, что при изготовлении фазных проводов используются, как правило, сталеалюминиевые провода, а при изготовлении грозозащитных тросов сталь. Отклонение от принятого в расчетах расстояния между фазным проводом и тросом приведет к неточности в расчетах реактивного сопротивления ВЛ, а следовательно и в расчетах потерь реактивного сопротивления.

Учитывая влияние температурного показателя на режим работы электроэнергетических систем, можно добиться повышения точности расчета потерь электрической энергии, повышение точности определения мест короткого замыкания и обрывов линии, уменьшить количество ложных отключений воздушной линии электропередачи, а так же более точному определению пропускной способности воздушных линий электропередач.

Библиографический список

1. **Боровицкий В.Г.**, Овсянников А.Г. Проблемы утренних отключений воздушных линий электропередачи: сб. докл. 4-й Российской науч.-практ. конф. «Линии электропередачи – 2010: Проектирование. Строительство. Опыт эксплуатации и научно-технический прогресс». – Новосибирск: ЭЛСИ, 2010. – С. 274 – 279.

*А.П. Макаров, А.В. Елкин, Л.В. Мелешкова;
рук. В.В. Сенько, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В современных условиях внедрения рыночных механизмов задачи планирования и управление режимов электроэнергетических систем

(ЭЭС) приобретают все большую актуальность и практическую значимость. Для оценки параметров установившихся и переходных режимов ЭЭС необходимо исследовать сходимость итерационных процессов их решения.

Для решения УУР (уравнений установившихся режимов) существуют различные модификации классического метода Ньютона – Рафсона, наиболее распространенными являются методы, хорошо описанные в работе [1]:

1) В методе Матвеева применяется итерационный процесс метода Ньютона – Рафсона при введении корректирующего коэффициента длины шага λ_k . Выбор достаточно малой величины шага λ^k позволяет на очередной итерации не выходить за область сходимости метода;

2) Метод Брауна заключается в том, что модифицируется прямой ход метода Гаусса при решении системы линейных уравнений на каждом шаге итерации: меняется вектор $\mathbf{X}^{(k)}$ по ходу формирования матрицы Якоби;

3) Метод П.И. Бартоломея также подразумевает изменение точки линеаризации от одного уравнения к другому [2]. Для изменения точек линеаризации для каждого нелинейного уравнения $f_i[\mathbf{X}^{(k)}] = 0$ осуществляется спуск из точки $\mathbf{X}^{(k)}$ в точку $\mathbf{X}^{(k)'}$ по направлению градиента, либо антиградиента функции $f_i[\mathbf{X}^{(k)}]$.

В задачах аналитического описания гиперповерхности предельных по статической устойчивости используются уравнения предельных режимов (УПР). В работе [3] следующей предложен вид УПР.

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \Delta\mathbf{Y}) = 0; \\ \mathbf{V}(\mathbf{X}, \mathbf{R}) = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \mathbf{R} = 0; \\ \mathbf{U}(\mathbf{R}) = \mathbf{R}^T \mathbf{R} - 1 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{F} – n -мерная вектор функция, отвечающая уравнениям баланса мощностей или токов в узлах; \mathbf{X} – искомый вектор нерегулируемых параметров (зависимых переменных); \mathbf{Y}_0 – заданный вектор регулируемых параметров соответствующие исходному режиму; $\Delta\mathbf{Y}$ – направление утяжеления в пространстве \mathbf{Y} ; \mathbf{V} – n -мерная функция; $\mathbf{R} = [r_1 \ r_2 \dots r_n]^T$ – собственный вектор матрицы $\left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T$, отвечающий нулевому собственному значению.

Авторами в среде VB.net и пакете MathCAD были разработаны компьютерные программы и модели для расчета установившихся и переходных режимов ЭЭС. И с их помощью произведены расчеты УУР и УПР для трёхузловой схемы, взятой из работы [4]. На рис. 1 приведен график предельной поверхности.

Результаты исследований показали, что для расчета установившихся и предельных режимов хорошо подходит метод Ньютона-Рафсона с при-

менением модификации основанной на ограничении длины шага. Сравнение способов задания УУР показало, что полярные координаты хорошо подходят для расчета установившихся режимов ЭЭС, а также задач противоаварийного управления, так как их применение обеспечивает более стабильную сходимости итерационных процессов, чем применение декартовых координат. Декартовые координаты удобнее применять в задачах анализа несимметричных режимов ЭЭС.

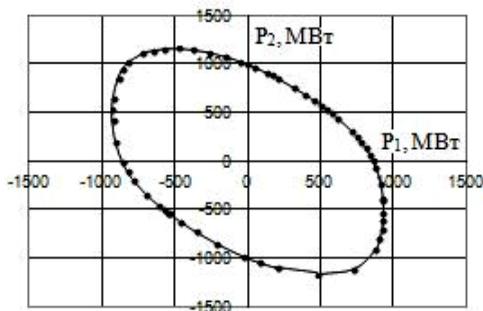


Рис. 1. Сечение предельной поверхности плоскостью Y1-Y2

Библиографический список

1. **Степкин, А.М.** Исследование эффективности методов расчета установившихся режимов электрических систем / А.М. Степкин // Материалы межрегиональной научно-технической конференции. – Братск, 2005. – 22 с.
2. **Бартоломей П.И.,** Окуловский С.К., Авраменко А.В., Ярославцев А.А. Повышение эффективности метода Ньютона при расчетах установившихся режимов больших электрических систем // Электричество. – 1982. – № 8.
3. **Крюков А.В.,** Намогуруев Б.Б. Алгоритмические особенности решения обобщенных уравнений предельных режимов энергосистем // Энергетика, информатика и плазменные технологии. – Улан-Удэ, 1996. – С. 225 – 235.
4. **Крюков А.В.** Предельные режимы электроэнергетических систем. – Иркутск : ИРГУПС, 2012. – 236 с.

*Л.С. Мышкина, асп.;
рук. Ф.Л. Бык, к.т.н., доц.
(НГТУ, г.Новосибирск)*

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА – ОСНОВА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Сегодня можно наблюдать появление пилотных проектов распределенных энергосистем. Основными элементами таких систем являются

распределительные сети и подключенная к ним малая генерация (станции мощностью до 25 МВт). Распределенные энергосистемы можно рассматривать как основу системы электроснабжения, в основе которых заложены сети 10 кВ. Тогда можно считать, что эти системы сформированы, но только пока в них отсутствует малая генерация (МГ). Современное законодательство не позволяет объединения генерирующих мощностей и сетевых компаний. Однако снятие данного ограничения в части МГ и распределительной сети позволит реализовать технические мероприятия по обеспечению бесперебойности электроснабжения потребителей. Так как включение в сеть МГ позволит, по сути, произвести резервирование линий классом напряжения выше генераторного, с точки зрения надежности. В таком представлении, можно возложить ответственность за бесперебойность энергоснабжения потребителей на распределенные энергосистемы, предоставив каждому потребителю право сформулировать свои требования в форме индекса надежности (ПИН). Что позволит производить корреляцию между тарифом на потребляемую электрическую энергию и мощностью и уровнем надежности электроснабжения. При этом, очевидно, что ПИН будет зависеть от индекса надежности центров питания (ЦП) распределенной энергосистемы, которая в свою очередь зависит от надежности передачи электрической энергии от объединенной энергосистемы до него.

Предлагается метод расчета ПИН для каждого потребителя основанный на показателях надежности электроснабжения согласно МЭК: *SAIFI*, *SAIDI*, *CAIDI*, *ASAI*, *ASIFI*, *ASIDI*, *AENS*. С учетом используемого сегодня для оценки надежности распределительных сетей показателя согласно [1]:

$$\begin{aligned} \text{ПИН} = & 0,3 \frac{\text{SAIDI}_{\text{план}}}{\text{SAIDI}_{\text{тек}}} + 0,2 \frac{\text{SAIFI}_{\text{план}}}{\text{SAIFI}_{\text{тек}}} + 0,1 \frac{\text{CAIDI}_{\text{план}}}{\text{CAIDI}_{\text{тек}}} , \\ & + 0,1 \frac{\text{ASIDI}_{\text{план}}}{\text{ASIDI}_{\text{тек}}} + 0,1 \frac{\text{AENS}_{\text{план}}}{\text{AENS}_{\text{тек}}} + 0,1 \frac{\text{ASAI}_{\text{тек}}}{\text{ASAI}_{\text{план}}} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\text{SAIDI}_{\text{план}}$, $\text{SAIFI}_{\text{план}}$, $\text{CAIDI}_{\text{план}}$, $\text{ASAI}_{\text{план}}$, $\text{ASIFI}_{\text{план}}$, $\text{ASIDI}_{\text{план}}$, $\text{AENS}_{\text{план}}$ – «плановые» значения показателей (для уровня надежности 1984 года); $\text{SAIDI}_{\text{тек}}$, $\text{SAIFI}_{\text{тек}}$, $\text{CAIDI}_{\text{тек}}$, $\text{ASAI}_{\text{тек}}$, $\text{ASIFI}_{\text{тек}}$, $\text{ASIDI}_{\text{тек}}$, $\text{AENS}_{\text{тек}}$ – текущие значения.

В качестве ПИН используется относительный показатель, так как каждая сеть индивидуальная, и имеет свой «плановый» уровень работы [2], определять который предлагается по уровню 1984 года, прописанного в РД 34.20.574. Основными параметрами для расчета индекса надежности потребителей являются: частота отключения нагрузки, среднее время восстановления питания и среднегодовая продолжительность отключе-

ний. Очевидно, что непосредственное влияние на эти параметры оказывает структура, топология, режим загрузки сети и категория надежности потребителя, учет которых производится согласно [3].

На территории г. Новосибирска разрабатывается пилотный проект распределенной энергосистемы «Академическая», не имеющий аналогов в России. Система состоит из трех ЦП, к которым предполагается подключение трех когенерационных станций.

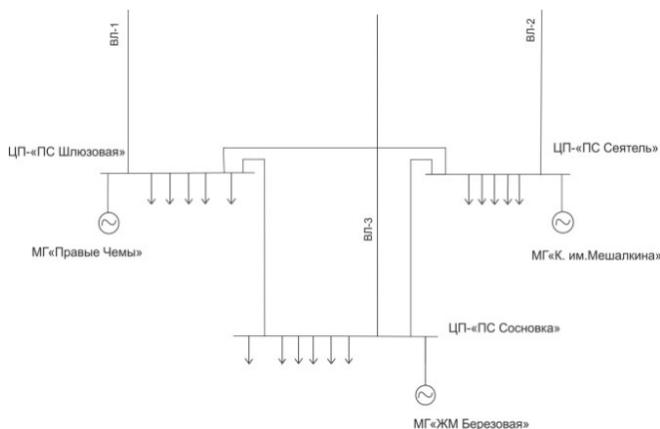


Рис. 1. Распределенная энергосистема «Академическая»

На примере представленной на рис. 1, схемы пилотного проекта распределенной энергосистемы, с помощью предложенного выше метода определены надежность индексы каждого потребителя рассматриваемой системы до подключения МГ и после. Показано влияние подключения объектов малой генерации к ЦП, с точки зрения повышения бесперебойности электроснабжения потребителей.

Библиографический список

1. **Положение** об определении применяемых при установлении долгосрочных тарифов показателей надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг, утвержденное Постановлением Правительства РФ от 31.12.2009 г. N 1220.
2. **Вук F.L., Kazakova L.S.** Efficient Ways and Means of Reliability Increase of Distribution Networks // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792 (2015): Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering – Pp. 280 – 285
3. **Кольшкни А.О., Мышкина Л.С.** Влияние безотказности элементов распределительной сети на надежность электроснабжения потребителей// Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всероссийской науч.-техн. конф. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во «Скан», 2015. – 1 Т. – С. 128 – 132.

*Е.С. Андреевков, асп.;
рук. А.И. Артемов, к.т.н., доц.
(Филиал ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Смоленске)*

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

При увеличении мощности нагрузки измерительного трансформатора напряжения (ТН), его погрешности увеличиваются линейно. Для каждого класса точности регламентируются границы величин полной вторичной нагрузки S и её коэффициент мощности $\cos\varphi$. В результате мощность нагрузки ТН в 5 – 6 раз меньше его максимальной мощности, допустимой по условиям нагрева. Поэтому задача компенсации погрешностей ТН в широком диапазоне изменения его нагрузок является актуальной.

В ходе данного исследования проведен анализ способов минимизации погрешностей и предлагается устройство обеспечивающее автоматическую компенсацию погрешностей при изменении первичного напряжения и вторичной нагрузки ТН при любом её характере в диапазоне, регламентированном ГОСТ 1983-2001. Рассматривались следующие способы компенсации погрешностей ТН:

1. Витковая коррекция [1].
2. Емкостная компенсация погрешностей [2].
3. Применение вольтодобавочных устройств [3].

В зарубежной практике [4 – 5] получили распространение электронные схемы, с включением электронных элементов в разрыв цепи вторичной нагрузки ТН. На взгляд авторов это снижает надежность вторичной цепи ТН при выходе из строя электронных блоков.

В данном исследовании предлагается оригинальный вариант системы компенсации погрешностей ТН, в которой падения напряжения в обмотках ТН измеряются и добавляются к напряжению вторичной обмотки ТН. Так как погрешности холостого хода легко компенсируются витковой коррекцией до нуля, то рассмотрение вопросов компенсации было сосредоточено на компенсации нагрузочных погрешностей.

Структурная схема разработанного алгоритма компенсации приведена на рис. 1. Напряжение, равное падению напряжения в первичной обмотке ТН $\Delta \dot{U}_{н1}$ в данной схеме реализуется вторичной цепью трансформатора тока ТТ, включенным в основную вторичную обмотку. В усилителе V_1 образуется напряжение, равное приведенному измеряемому напряжению \dot{U}'_1 . На усилителе V_2 формируется разность напряжения \dot{U}'_1 и фактиче-

ского напряжения на нагрузке $\dot{U}_{2н}$, которая и является необходимой до-
 бавкой ЭДС $\dot{U}'_{2н}$. Напряжение вольтодобавки усиливается и передается
 через ВДТ во вторичную цепь, выполняя условие $\dot{U}'_{2н} = \dot{U}'_1$.

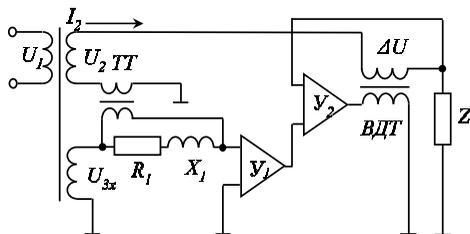


Рис. 1. Структурная схема ТН с формированием вольтодобавки сравнением измеряемого напряжения и фактического на нагрузке.

Когда дополнительная обмотка так же нагружена, то в её цепь включается дополнительный ТТ, в котором формируется падение напряжения в обмотках ТН от нагрузки дополнительной обмотки и суммируется с приведенным ранее напряжением вольтодобавки, после чего подается на операционный усилитель Y_1 .

Наличие вольтодобавочного трансформатора во вторичной цепи ТН при повреждении электронного блока ТН позволяет сохранить работоспособность ТН, но с некомпенсированными погрешностями. Такое решение обеспечивает работу ТН без снижения надежности.

Согласно приведенной схеме изготовлен макетный образец устройства автоматической компенсации погрешностей ТН и проведены его лабораторные испытания.

Библиографический список

1. Дымков А.М. [и др.] Трансформаторы напряжения / А.М. Дымков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.
2. Малый А.С. Емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения / А.С. Малый // Электрические станции. – 1991. – № 5. – С. 28 – 34.
3. Артемов А.И. Компенсация погрешностей трансформаторов напряжения 6-10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов / А.И. Артемов, В.А. Левченко, А.Г. Сидоров // Труды Международного Форума по вопросам науки, техники и образования. Т. 2. – М.: Академия Наук о Земле, 2005. – С. 133 – 134.
4. Sankaran P., Kanagasabapathy P., Murti V.G.K. Electronic error compensation of a voltage transformer // IEEE Trans. Instrum. Meas., 1979. – Vol. 28. – Pp. 86 – 88.
5. Slomovitz D. Electronic compensation of Voltage Transformer // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. – N. 4. – Pp. 652 – 654.

*А.О. Редькин, студ.;
рук. Д.Е. Титов, к.т.н.
(КТИ, г. Камышин)*

СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННЫХ ИЗОЛИРУЮЩИХ ПОДВЕСОК В СЕТЯХ 110 – 500 кВ

Одна из основных проблем обслуживания воздушных линий – это своевременная замена поврежденных изоляторов. Автоматика подстанции определяет место повреждения линии 110 кВ и выше с точностью 3 % длины линии, на практике 10 – 20 км.

Наше предлагаемое решение.

Устройство индикации пробоя (УИП) устанавливается под потенциалом провода на каждой изолирующей подвеске ВЛ с эффективно заземленной нейтралью 110 кВ и выше.

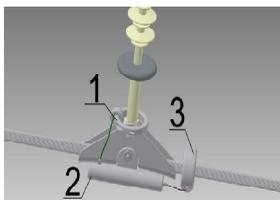


Рис. 1. Устройство индикации пробоя изолятора: 1 – измерительный трансформатор тока; 2 – IP-защищенный корпус; 3 – устройство отбора мощности с провода

Достоинства устройства

1. Наше устройство универсально: применимо на любой подвеске в сетях с эффективно заземленной нейтралью. Для расширения области применения УИП (в сетях с изолированной нейтралью 6 – 35 кВ) необходимо отстраивать УИП от емкостного тока однофазного замыкания на землю, что требует проведения дополнительных исследований. Исследования планируется провести до мая 2016 года.

2. Принцип действия устройства позволяет в перспективе не только устанавливать факт случившегося ОЗЗ, но и диагностировать предпробойное состояние изолятора, проводя измерения токов утечки и передавая эти показания при плановых осмотрах линии. Оценка состояния изолятора по величине тока утечки осложнена отсутствием достоверных данных о возможных диапазонах этих токов. Результаты известных исследований противоречат друг другу. Поэтому необходимо провести независимое исследование по определению значений токов утечки для

дальнейшей диагностики предпробойного состояния изолятора. Работы планируется провести до мая 2016 года.

3. Главное достоинство – стоимость 600 руб. Полимерная подвеска с нашим устройством стоит меньше гирлянды стеклянных или фарфоровых изоляторов, поэтому данная инновация может ускорить внедрение полимеров в соответствии с технической политикой Россети.

Технико-экономическое обоснование.

В расчетах срока окупаемости установки устройств индикации принимается наличие системного эффекта только от снижения времени поиска поврежденного изолятора (увеличение отпущенной электроэнергии). Снижение затрат на организацию поиска, минимизация риска возникновения аварии благодаря наличию информации о токах утечки и т.д. не учитываются в расчетах, но имеют место.

Таблица 1. Технико-экономическое обоснование устройства

Класс напряжения, кВ	110	220	330	500
Статистическое число отказов на 100 км линии в год	3,9	1,7	1,3	0,6
В том числе по причине повреждения изоляторов	1,17	0,51	0,39	0,18
Количество изоляторов на км линии	12,9	9,8	9	9
Снижение времени поиска поврежденной подвески, часов	3,5	3,5	3,5	3,5
расчетная мощность при нормированной плотности тока, МВт	29,2	76	230	650
среднесуточная нагрузка, при $T_{max} = 5000$ ч/год, МВт	16,67	43,38	131,28	371,00
Тариф руб./кВт·час	2,91	2,91	2,91	2,91
Снижение недоотпуска электроэнергии в год	662025	751085	1738193	2267209
Стоимость устройств индикации на 100 км линии	774000	588000	540000	540000
Комплексный показатель стоимости решения на 100 км линии	778000	592000	544000	544000
Срок окупаемости, лет	1,18	0,79	0,31	0,24

Библиографический список

1. **Диагностика**, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учеб. пособие / И.И. Левченко [и др.]. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с.
2. **Расчет**, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС. – 2004. – 280 с.
3. **Справочник** по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.

*К.С. Никифоров, магистрант, Д.А. Савватеев, студ.
рук. Т.Н. Яковкина, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск)*

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ 220 КВ «БРАТСКАЯ ГЭС – ПОДСТАНЦИЯ НПС-4»

В настоящее время планируется реконструкция участка электрической сети 220 кВ Братского энергорайона, прилегающего к ОРУ 220 кВ Братской ГЭС, что связано со строительством Братского сталелитейного завода и подключением новых нагрузок. В частности с целью повышения надежности и пропускной способности электрической сети планируется строительство воздушной линии (ВЛ) 220 кВ «Братская ГЭС – подстанция (ПС) НПС-4». Общая длина проектируемой ВЛ – 6238,82 м. Токовая нагрузка зимнего максимума для расчетного участка сети в перспективе на 2018 г. составляет 345,4 А.

Инжиниринговой компанией ООО «Премьер-Энерго» был разработан проект строительства ВЛ 220 кВ «Братская ГЭС – ПС НПС-4» с применением традиционных проводов марки АС и опор типа П220-1.

В качестве альтернативного варианта авторами статьи предложен вариант строительства линии с применением новых технологий, в частности – высокотемпературных проводов и стальных многогранных опор (ММО).

Достоинствами высокотемпературных проводов являются повышенная механическая и термическая стойкость, способность передавать большие токи и мощности с минимальными потерями. Применение ММО, в свою очередь, способствует снижению капитальных затрат и сокращению сроков строительства ВЛ [1, 2].

В рамках данной темы был произведен сравнительный анализ различных марок высокотемпературных проводов, и в зависимости от напряжения, расчётной токовой нагрузки, района по гололёду, материала и цепности опор был выбран провод марки Dove 557 АССР. Далее были произведены электрические, механические и технико-экономические расчеты ВЛ 220кВ «Братская ГЭС – ПС НПС-4» для двух вариантов [3]:

- с подвеской высокотемпературного провода Dove 557 АССР на металлических многогранных опорах;
- с подвеской сталеалюминиевого провода марки АС 400/51 на стальных решетчатых опорах.

Также для рассматриваемых вариантов в работе произведен расчет нагрузочных потерь электрической энергии.

В целом, результаты проведенных расчетов показали, что применение провода Dove 557 ACCR позволит значительно улучшить механические и физические свойства проектируемой ВЛ, т.к. композитный сердечник значительно превосходит стальные и алюминиевые аналоги: прочность композитного сердечника сравнима со стальным и в 8 раз выше алюминиевого; масса композитного сердечника в 2 раза меньше стального и всего на 20 % больше массы чистого алюминия; электропроводность композитного сердечника в 4 раза выше стального; жесткость – в 3 раза выше алюминиевого сердечника. Расчеты также подтвердили, что стрелы провеса для высокотемпературного провода значительно меньше, чем у провода марки АС, что при проектировании ВЛ позволит выбрать опоры меньшей высоты и получить экономию на металле опор. Кроме того, при применении высокотемпературного провода провода Dove 557 ACCR экономия по потерям активной энергии составит порядка 12 %, по нагрузочным потерям активной и реактивной мощности – 12 – 20 %. Многогранные опоры позволят сэкономить на транспортировке и строительномонтажных работах, а также снизят затраты на эксплуатацию, ликвидацию и утилизацию.

Экономический эффект при строительстве ЛЭП на многогранных опорах составляет 40 – 45 % по сравнению с решетчатыми.

Библиографический список

1. **Композитный** усиленный алюминиевый провод 3М™ ACCR. Режим доступа: http://solutions.3mruussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/EMD_ACCR/ACCR_Home. (дата обращения: 20.10.2015).

2. **Стальные** многогранные опоры ЛЭП. Режим доступа: <http://elektropostavka.ru/stal-mnogogran-opor/>. (дата обращения: 16.12.2015).

3. **Никифоров К.С.**, Яковкина Т.Н., Карпова Н.А. Оценка эффективности внедрения новых технологий при проектировании воздушной линии 220 кВ «Братская ГЭС – подстанция НПС-4» // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки: в 2 т. – Братск: Изд-во «БрГУ», 2015. – Т. 1. – С. 159 – 164.

А.А. Муканина, студ.;
рук. К.В. Сулов, к.т.н., доц.,
Д.О. Герасимов, доц.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Концепция виртуальных электрических станций находит широкое применение при оптимизации режимов работы современных систем

электроэнергии [1]. Однако, появление новой элементной базы, позволяющей накапливать и легко преобразовывать друг в друга различные виды энергии [2], делает необходимым введение понятия интегрированных энергетических систем [3].

Постоянство графика нагрузки является оптимальным режимом работы генерирующих станций и сетевой инфраструктуры, что позволяет исключить работу генерирующих и передающих устройств в переходных режимах и приблизить коэффициент полезного действия преобразования того или иного энергоносителя в электрическую энергию к максимально возможному. Вместе с тем, изменение графиков нагрузки потребителей делает обеспечение данного режима работы невозможным при использовании традиционных технологий. Данную проблему позволяет решить концепция интегрированных энергетических систем основой которой является энергетический хаб.

Для анализа энергетической системы с разными энергоносителями и с учетом их взаимного влияния были введены электрические хабы [4]. Общая модель такого хаба, где различные энергоносители преобразуются, накапливаются и распространяются в целях удовлетворения энергетических потребностей, представлена в [4, 5].

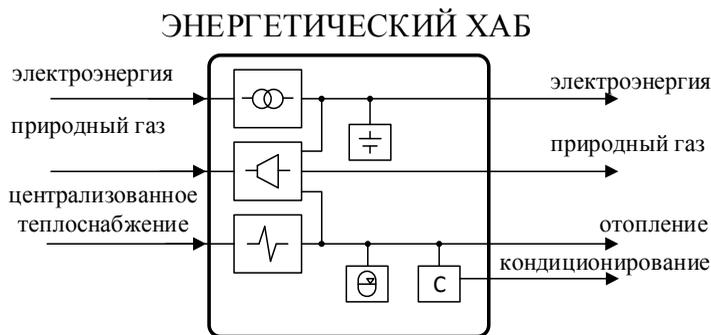


Рис. 1. Структурная схема энергетического хаба

Нами предлагается рассмотреть следующие подходы к возможности оптимизации энергопотребления с учетом идеологии виртуальной электростанции и интегрированных систем энергоснабжения.

Необходимо дать четкую классификацию активных потребителей с учетом их характеристик, разработать непротиворечивую технико-экономическую модель структуры энергопотребления активных потребителей, с учетом специфики местных условий разработать модели энергетических хабов.

Поскольку в дальнейшем предполагается рассматривать интегрированные системы энергоснабжения, необходимо ввести систему относительных единиц, позволяющую увязывать различные типы энергоносителей и учитывать неизбежные потери при преобразовании их друг в друга.

Ставится задача подобрать соответствующий математический аппарат адекватно описывающий процессы происходящие в интегрированных системах.

Библиографический список

1. **Suslov K.V.**, Solodusha S.V., Gerasimov D.O. A new algorithm for isolated electricity supply system control // International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies EDST, 2015. – С. 26 – 31.
2. **Воропай Н.И.**, Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – № 1. – С. 64 – 73.
3. **Geidl M.** Energy hubs for the futures // IEEE Power Energy Mag. – 2007. – Vol. 5. – № 1. – Pp. 24 – 30.
4. **Good N.**, Karangelos E., Navarro-Espinosa A., Mancarella P. Optimization Under Uncertainty of Thermal Storage-Based Flexible Demand Response With Quantification of Residential Users' Discomfort // IEEE Transaction on Smart Grid. – 2015. – Vol. 6. – № 5. – P. 2333 – 2340.
5. **Aizenberg N.**, Stashkevich E. Pricing mechanism for electricity demand management to optimize operation of power supply systems // International Conference on Problems of Critical Infrastructures Joint 6th Conference of International Institute for Critical Infrastructures and 6th International Conference on Liberalization and Modernization of Power Systems. – 2015. – С. 161 – 167.

В.А. Винников, студ.;
рук. К.В. Суслов, к.т.н., Д.О. Герасимов, доц.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Современные изолированные энергорайоны, осуществляющие электроснабжение промышленных предприятий с широким диапазоном потребляемой мощности, характеризуются наличием разнообразных источников электрической энергии, одним из которых является газотурбинная установка. Данная работа ориентирована на разработку математической модели газотурбинной установки (далее ГТУ) типа «вход-выход». Результаты исследования могут быть применены для оптимизации энергетических процессов в изолированных энергетических системах, например, для оптимизации устойчивости генератора, входящего в систему генерации электрической энергии наряду с ГТУ, анализа причин возникновения крутильных субсинхронных колебаний ГТУ в узлах промышленной нагрузки.

В последнее время наблюдается ежегодный прирост вводов объектов распределенной генерации происходящий в основном за счет применения газотурбинных, дизельных и газопоршневых генерирующих установок, так как подавляющее большинство изолированных районов находится в регионах с месторождениями природных ископаемых на основе углеводорода.

ГТУ по ряду своих технологических параметров являются наиболее оптимальными для электроснабжения небольших изолированных районов. Исследование, проведенное в работе [1] показывает, что постоянная времени ГТУ соизмерима с постоянной времени контуров регулирования синхронных генераторов, что делает необходимым учитывать при автоматической системы регулирования ГТУ динамические характеристики самой установки.

Другой опыт эксплуатации ГТУ [2] позволил выявить ряд недостатков, связанных при построении автоматической системы управления ГТУ, так как в данном подходе при анализе энергетических процессов за основу берется тепловой расчет. Данный подход не полностью оправдан с точки зрения анализа динамики электроэнергетических процессов, происходящих в электроэнергетической системе.

Анализ работ показывает, что более точный анализ процессов в ГТУ возможен при описании модели на основе типовых динамических звеньев и коэффициентами усиления [3,4].

За основу структурной схемы взяты блоки: компрессор, камера сгорания и турбина. Управляющими воздействиями являются давление, созданное компрессором и расход топлива, поступающего в камеру сгорания. Такая структура позволяет учитывать основные закономерности при преобразовании тепловой энергии во вращающийся момент и момент сопротивления, создаваемый на валу турбины электрогенератором, возникающий при изменении электрической нагрузки потребителя.

Разработанная упрощенная математическая модель ГТУ, учитывающая основные факторы, влияющие на динамику электроэнергетических процессов, позволяет проводить анализ режимов работы изолированной энергетической системы, содержащей несколько источников электрической энергии, включая возобновляемые источники и накопители электрической энергии.

Библиографический список

1. **Моделирование** газотурбинных установок при анализе электромеханических переходных процессов / А.С. Герасимов, А.Н. Смирнов // Известия НТЦ ЕЭС. – 2013. – № 2. – С. 6 – 12.

2. **Опыт** разработки алгоритмов управления газотурбинными энергоблоками малой мощности / О.В. Зубкова и др. // Промышленная энергетика. – 2009. – № 9. – С. 16 – 17.

3. **Suslov K.V.**, Gerasimov D.O., Solodusha S.V. Smart grid: Algorithms for control of active-adaptive network components // IEEE POWERTECH Eindhoven, 2015.

4. **Hajagos L.M.**, Berube G.R. Utility experience with gas turbine testing and modeling // IEEE Power Eng. Soc. Winter Power Meeting, 2001.

И.А. Журавлева, Т.Ю. Сухоручкина, студ.;
Н.Ю. Шевченко, к.т.н.
(КТИ (филиал) ВолгГТУ, г. Камышин)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА БОЛЬШИХ ПЕРЕХОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

При сооружении больших переходов через водные преграды, горные ущелья и т.п. возникает потребность в применении проводов нового поколения с повышенной пропускной способностью, высокой механической прочностью и малой стрелой провеса [1].

Создание высокотемпературных (рабочая температура 150 – 200° С) проводов с малой стрелой провеса требует применения материалов с пониженным значением температурного коэффициента линейного расширения. Примеры материалов, используемых для изготовления высокотемпературных проводов (ВТП) приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1. Температурный коэффициент линейного расширения

№	Материал	$k_T, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
1	Высокопрочная сталь марки EST	11,5
2	Металлокомпозит (Al + Al ₂ O ₃)	6,0
3	Железоникелевый сплав (Invar)	3,7
4	Полимеркомпозит	1,6

При использовании данных проводов требуется большая прочность конструкций опор, натяжных и поддерживающих зажимов.

Для увеличения надёжности больших переходов ВЛ следует рассматривать в качестве вариантов сооружения переходных опор применение опор анкерного типа [2].

В России разработан ряд проектов больших переходов воздушных линий электропередачи через водные преграды с применением проводов нового поколения. Примеры внедренных проектов:

– переход ВЛ 220 кВ Пермская ГРЭС – Соболи-1, 2 через Камское водохранилище общей протяжённостью 2,08 км с применением высокотемпературного провода с повышенной прочностью марки ACS 521-A20SA из стали, плакированной алюминием. Данное решение позволило умень-

шить высоту переходной опоры на 50 м и сократить сметную стоимость строительства на 17 % по сравнению с использованием провода АС500/336 (2009 год);

– переход ВЛ 220 кВ Печорская ГРЭС – Ухта – Микунь через реку Печора выполнен проводом АС 548-А20СА. Сметная стоимость строительства сокращена на 15 % по сравнению с применением провода АС500/336 (2009 год);

– в 2011 году построен специальный переход ВЛ Балаково через реку Волга с применением ВТП АС 521-А20СА, что позволило уменьшить высоту переходных опор с 165 до 125 м и сократить сметную стоимость строительства на 14 %;

– переходы ВЛ 500 кВ Советско – Соснинская – Парабель через реки Обь и Васюган выполнены с применением ВТП ТАКСR/АС 146-TAL/519-А20СА на опорах индивидуального изготовления из труб, что позволило уменьшить высоту переходной опоры на 40 м по сравнению с вариантом использования провода АС500/336 (2012 год).

Актуальной задачей является технико-экономическое сопоставление вариантов применения современных типов проводов на больших переходах.

Во всех вышеперечисленных примерах применение проводов нового поколения на больших переходах с учётом оптимизации конструкций опор перехода и фундаментов к ним позволяют существенно сократить стоимость строительства переходов за счёт уменьшения материалоемкости конструкций опор и фундаментов, а также сокращения трудозатрат на их изготовление и монтаж [3].

Вывод: при сооружении больших переходов через водные преграды, горные ущелья и т.п. применение проводов нового поколения, обладающих улучшенными механическими и электрическими характеристиками по сравнению с проводами АС (АКСR) традиционной конструкции, специальной натяжной, соединительной и поддерживающей арматуры способствует повышению пропускной способности, повышению надежности электроснабжения и снижению сметной стоимости строительства.

Библиографический список

1. **Нормы** технологического проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 35 – 750 кВ.
2. **Колосов С.В.**, Рыжов С.В., Сюксин В.Е. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений // Опыт, устремленный в будущее. – ЗАО «Электросетьстройпроект», 2013. – С. 26 – 36.
3. **Ермаков А.** Передача энергии по высокотехнологичным проводам // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2012. – № 5. – С. 54 – 55.
4. **Справочник** по проводам нового поколения // Энергоэксперт. – № 1. – 2015. – С. 16 – 6.
5. **Котов Р.В.** Сравнение технологий производства композитных проводов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – № 1. – С. 46 – 47.

Сороко В.В., студ.;
рук. Ю.В. Бладыко, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)

РАСЧЕТ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ДЕМПИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Дифференциальные уравнения второго порядка, описывающие статику гибкой упругой нити [1], являются нелинейными. Их численное решение производится разностным методом с помощью ЭВМ. Система конечно-разностных уравнений решается на основе вложенных друг в друга итераций: относительно координат, тяжения или длины провода. При наличии ответвлений к электрическим аппаратам и при применении демпфирующих устройств добавляется еще одна итерация по координатам точек их крепления к гибким шинам и опорам распределительных устройств (РУ). Эти координаты являются функцией тяжения в отпайке, а при наличии демпфирующих устройств – функцией тяжения в проводе, а оно в свою очередь зависит от положения провода.

Уравнения динамики описывают движение провода на участке между гирляндами изоляторов. Аналогично описываются гирлянды изоляторов как гибкие нити. Математическое моделирование динамики опор и демпферов при коротком замыкании (КЗ) производится обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка. Они имеют следующий вид:

$$M_o \frac{d^2 x}{dt^2} + C_x x + f_o \frac{dx}{dt} = T_{дин} ,$$

где C_x – линейная упругая жесткость демпфера; x – координата вдоль пролета; f_o – линейная вязкостная жесткость демпфера.

При $t = 0$ определяются начальные условия

$$c(x) x_0 = T_0 .$$

Отсюда

$$x_0 = \frac{T_0}{c(x)} .$$

Далее ставится смешанная краевая задача динамики проводов гибкой ошиновки РУ с начальными и краевыми условиями. Начальными условиями для проводов пролета гибкой ошиновки являются координаты, масса опоры и демпфера. В качестве примера рассматривается расчет ди-

намики проводов при КЗ для опытного пролета длиной 12 м, который использовался рабочей группой 23-02 СИГРЭ в качестве стандартной установки для сравнения методов расчета. Высота опорных изоляторов этой установки составляет 2,1 м, масса изолятора равна 140 кг, а экспериментальная жесткость – 200 кН/м. В пролете натянуты провода с тяжением 2 кН и массой 2 кг/м. Расстояние между ними составляет 2,6 м. Расчеты выполняются по разработанной программе, дополненной подпрограммой вычисления краевых условий на опорных изоляторах с учетом демпферов, при токах КЗ 10, 20 и 30 кА (рис. 1). Для сравнения производятся расчеты динамики проводов этого пролета с неподвижными концами без демпферов. При заданной жесткости изоляторов (демпферов) их динамические прогибы заметно снижают частоту колебаний проводов и их максимальные тяжения при КЗ. Максимальные отклонения проводов с подвижными концами больше, чем с неподвижными. Влияние упругой податливости опорных изоляторов (демпферов) возрастает с увеличением тока КЗ. Наибольшее сближение проводов наблюдается при отключении тока в момент времени, когда тяжения максимальны.

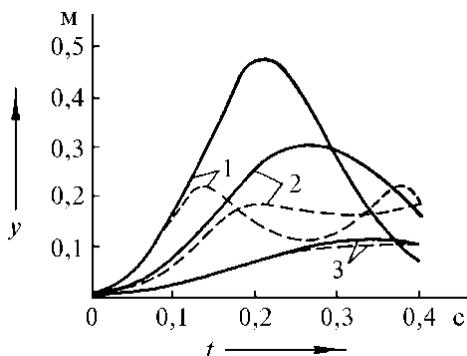


Рис. 1. Динамика отклонения средней точки провода: — на упругих опорных изоляторах; ---- на абсолютно жестких; 1 – при токе КЗ, равном 30 кА; 2 – 20; 3 – 10 кА

На основе проведенных расчетных экспериментов можно сделать вывод, что при выборе демпфера необходимо учитывать его влияние как на срез тяжений так и на сближения проводников.

Библиографический список

1. Стрелюк М.И., Сергей И.И., Бладыко Ю.В. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий // Изв. вузов: Энергетика. – 1983. – № 8. – С. 8 – 14.

М.И. Петров, асп.;
рук. П.А. Рашитов, к.т.н., ст. преп.,
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО МУПК

Возможной альтернативой традиционным устройствам FACTS (по ряду направлений их функциональной деятельности) являются малогабаритные устройства распределенной продольной компенсации (МУПК) [1]. Данный класс устройств за счёт управляемого воздействия на реактивную составляющую сопротивления линии электропередач (ЛЭП) может осуществлять изменение их пропускной способности, обеспечивая оптимальное перераспределение потоков мощности между перегруженными и недогруженными линиями.

МУПК являются устройствами и силовой электроники, предназначенными для монтажа непосредственно на проводах ЛЭП, целостность проводов при этом не нарушается.

Возможны различные варианты исполнения МУПК, одним из них является индуктивно-емкостной МУПК. Данный тип МУПК, в соответствии с названием, позволяет вносить в линию сопротивление как индуктивного, так и емкостного характера. Основными элементами такого МУПК являются трансформатор цилиндрической формы и конденсатор, подключенной ко вторичной стороне, емкость которого дискретно изменяется в зависимости от текущих параметров энергосети.

В общем виде индуктивно-емкостной МУПК может находиться в 4 режимах.

1. Режим байпас. В данном режиме вторичная обмотка короткозамкнутая, МУПК выступает в роли трансформатора тока, что говорит о линейном режиме работы на всем диапазоне токов и не оказывает влияния на линию электропередач.

2. Режим инжекции 1. В данном режиме вторичная обмотка разомкнута, МУПК выступает в роли дросселя и вносит дополнительное индуктивное сопротивление в линию, величина которого определяется индуктивностью намагничивания силового трансформатора. Током намагничивания трансформатора является ток в линии электропередач.

3. Режим инжекции 2. К вторичной стороне подключается некоторая емкость, при которой в линию будет вноситься реактивное сопротивление индуктивного характера, превышающее индуктивность намагничивания трансформатора. Подключение эквивалентного конденсатора

к вторичной обмотке силового трансформатора приводит к увеличению тока намагничивания трансформатора. Величина тока вторичной обмотки и тока намагничивания трансформатора зависит от коэффициента инжекции ($K_{инж}$)

$$K_{инж} = \frac{X_{экв}}{j \cdot \omega \cdot L_{ц}},$$

где $X_{экв}$ – эквивалентное реактивное сопротивление, вносимое колебательным контуром (параллельное соединение индуктивности намагничивания и конденсатора); $L_{ц}$ – индуктивность намагничивания трансформатора.

4. Режим инжекции 3. Во вторичную цепь подключается емкость такой величины, при которой в линию будет вноситься реактивное сопротивление емкостного характера, по величине превышающее индуктивность намагничивания трансформатора. Как и в предыдущем режиме будет наблюдаться увеличение тока намагничивания трансформатора, величина которого, как и величина тока вторичной стороны, зависит от коэффициента инжекции.

Были проведены исследования с целью изучения особенностей работы индуктивно-емкостного МУПК и подтверждения результатов аналитических расчетов. Исследования проводились с помощью физического эксперимента, для этого был собран макет индуктивно-емкостного МУПК. В ходе экспериментов были проведены опыты в каждом из режимов, результаты которых подтвердили теоретические выкладки и аналитические расчеты при работе силового трансформатора в линейном режиме. В насыщении же, в следствие изменения индуктивности намагничивания трансформатора, меняется вносимое в линию эквивалентное сопротивление, что сказывается на величине тока намагничивания. В среде Matlab Simulink разработана имитационная модель индуктивно-емкостного МУПК с параметрами, соответствующие макету. В ходе моделирования были получены результаты идентичные результатам физических экспериментов, говорящие об адекватности собранной модели. Так же было проведено исследование переходных процессов в электрических цепях МУПК, в моменты изменения структуры вторичной стороны. Исходя из результатов этих исследований следует вывод о целесообразности включения конденсаторных ветвей вторичной стороны в моменты амплитуды тока линии.

Библиографический список

1. **Divan D.**, Brumsickle W., Schneider R., Kranz B., Gascoigne R., Bradshaw D., Ingram M., Grant I. A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on existing Power Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – № NO 1. – Pp. 642 – 649.

А.А. Чернышев, асп.;
рук. Д.И. Панфилов, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

РАЗРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОТОКА МОЩНОСТИ ДЛЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ СТАТКОМА

Несмотря на то, что многие из устройств, относящихся к гибким (управляемым) системам переменного тока (FACTS), разработаны более 20 лет назад, в России они не получили широкого распространения. Это, в частности, связано с их относительно высокой стоимостью, длительным сроком сооружения и необходимостью отведения значительных площадей для размещения. Возможной альтернативой традиционным устройствам FACTS (по ряду направлений их функциональной деятельности) являются малогабаритные устройства распределенной продольной компенсации (МУПК).

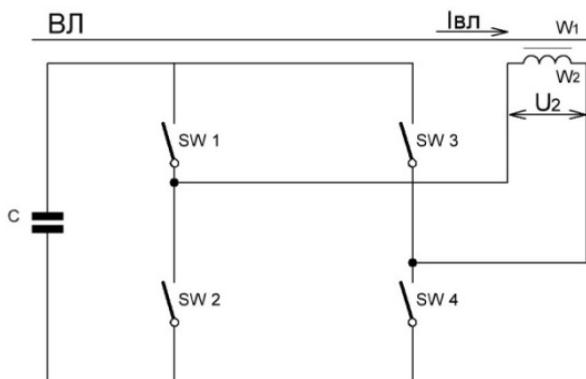


Рис. 1. Силовая схема преобразователя МУПК

Данный класс устройств за счёт управляемого воздействия на реактивную составляющую сопротивления ВЛ электропередачи может осуществлять изменение ее пропускной способности, обеспечивая оптимальное перераспределение потоков мощности между перегруженными и недогруженными линиями [1]. Изменение реактивной составляющей сопротивления ВЛ осуществляется методом формирования синусоидального напряжения на участке провода ВЛ, на котором расположено малогабаритное устройство продольной компенсации.

В состав малогабаритного устройства продольной компенсации входят трансформатор, первичной обмоткой которого является провод линии электропередачи, и преобразователь, подключенный к вторичной обмотке трансформатора [2]. Представлена структура системы управления преобразователем, позволяющая реализовывать различные алгоритмы управления ключами. Формирование первой гармоники напряжения на выходе преобразователя осуществляется методом ШИМ. Регулирование первой гармоники напряжения осуществляется как по амплитуде, так и по фазе относительно тока линии, протекающего через первичную обмотку трансформатора. Уровень напряжения в преобразователе на стороне постоянного тока определяется уровнем напряжения на буферном конденсаторе. Заряд конденсатора осуществляется в процессе включения схемы и задания определенного закона управления его ключами.

Проведен анализ переходных и установившихся процессов в схеме в предположении, что в первичной обмотке трансформатора протекает ток от источника тока (ток линии). Выделено два режима работы схемы:

- переходной режим – режим заряда, изменения напряжения на буферном конденсаторе до установленного значения
- установившийся режим – режим работы устройства, при котором, амплитуда напряжения, формируемого на выходе силового преобразователя, постоянна.

Получены основные соотношения для расчета токов и напряжений в схеме и величины вносимого реактивного сопротивления в линию электропередачи без учета и с учетом потерь энергии в магнитопроводе. Приведены векторные диаграммы, поясняющие электромагнитные процессы в основных контурах схемы при различных режимах работы преобразователя.

Представлена методика расчета параметров основных элементов схемы и силовых ключей. Показано, что величина емкости буферного конденсатора определяется величиной допустимых пульсаций напряжения на буферном конденсаторе.

Библиографический список

1. V. Narasimha Murthy, P. Bhaskar Prasad, K. Harinath Reddy. Application of Distributed Static Series Controller (DSSC) Modified with Fuzzy Logic and ANFIS Controllers as Auxiliary Controller in Extenuation of Sub-Synchronous Resonance // International Journal of Engineering Research and Development, IEEE. – Vol. 10. – 2014. – Pp. 18 – 26.
2. Poriya Fajri, Saeed Afsharnia. A PSCAD/EMTDC Model for Distributed Static Series Compensator (DSSC) // IEEE Xplore, 2008.

К.В. Расули, асп.;
рук. Е.Е. Чаплыгин, к.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКОВОЙ ЗАГРУЗКИ ЛЭП

В современной электроэнергетике для передачи электроэнергии зачастую используются параллельные транзиты, представляющие собой параллельно включенные высоковольтные линии электропередачи разного напряжения. При таком способе передачи электроэнергии при естественном распределении потоков мощности, обусловленном собственными сопротивлениями линий, возникает проблема чрезмерной загрузки током линии более низкого напряжения при недогрузке линии более высокого напряжения. Для решения подобных задач в мировой практике используются устройства гибких линий электропередачи (FACTS) [2].

В настоящее время существует ряд вариантов решения этой задачи, которые большей частью находятся в стадии проектной проработки [1, 2], одним из них является применение гибридного тиристорного источника реактивной мощности (ИРМ) на базе преобразователя постоянного/переменного тока с индуктивным накопителем энергии, подключаемого последовательно к линии электропередачи [1]. Данное устройство позволяет регулировать ток линии электропередачи внутренними средствами и обладает такими преимуществами, как возможности плавного регулирования тока и ограничения токов короткого замыкания линии. Преимуществом устройства является и построение его на базе тириستоров.

Рассматриваются два варианта исполнения устройства – однофазный и трехфазный. Однофазный вариант предполагает включение одного ИРМ в каждую фазу сети. Выбор между двумя вариантами ИРМ на данном этапе исследований представляется преждевременным, поскольку трехфазный вариант имеет преимущество по аппаратным затратам на силовую часть, а однофазный вариант может быть предпочтительным с учетом протекания аварийных режимов.

Поскольку устройство должно создаваться с учетом возможных коротких замыканий в линии электропередачи, в этих режимах к нему может быть приложено со стороны линии напряжение источника энергии, поэтому необходимо подключение ИРМ к линии через понижающий трансформатор (трансформаторы) с коэффициентом трансформации k_T , что исключает пробой тиристоров в режиме короткого замыкания линии. В трехфазном варианте ИРМ используется трехфазный тиристорный

мост, включаемый в линию электропередачи через трансформатор. При этом каждая из первичных обмоток трансформатора включена последовательно в каждую из фаз линии электропередачи, а вторичные обмотки, подключенные к преобразователю, соединены в звезду.

На стороне постоянного тока тиристорного преобразователя включен индуктивный накопитель энергии L_d . Регулирование тока реактора L_d определяет текущее значение тока линии. Тиристорный преобразователь функционирует на границе выпрямительного и инверторного режима. Для увеличения (уменьшения) тока реактора угол задержки включения α уменьшается (увеличивается). В установившемся режиме значение угла задержки включения балансирует вблизи $\alpha = 90$ градусов.

На стороне переменного тока тиристорный блок формирует импульсы тока прямоугольной формы. Со стороны переменного тока устройство защищено пассивным фильтром в виде резонансного LC -контура с частотой резонанса, равной частоте сети. Пассивный фильтр замыкает на себя высокочастотные гармоники, генерируемые тиристорным преобразователем, и обеспечивает синусоидальность токов, протекающих через трансформатор, и токов линии.

Показана принципиальная возможность функционирования последовательных ИРМ при помощи имитационного моделирования. Проведено исследование работы ИРМ в различных режимах. Определены критерии выбора параметров элементов ИРМ. Также проведен анализ работы ИРМ в аварийных режимах.

Библиографический список

1. **Чаплыгин Е.Е.**, Асташев М.Г., Расули К.В. Применение активных источников реактивной мощности для перераспределения потоков энергии в электрических сетях // Электротехника. – № 12. – 2013.
2. **Кочкин В.И.**, Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. – Торус Пресс, 2011. – 312 с.

В.П. Ангельчева, Н.Г. Кузнецов, студ.;
рук. О.А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В настоящее время все более широкое применение находят новые конструкции воздушных линий электропередачи (ВЛ), отличные от традиционных. Одним из наиболее эффективных средств развития электри-

ческих сетей является создание компактных ВЛ. Применение электропередач переменного тока нового поколения позволит повысить эффективность функционирования электросетевого комплекса и является одним из направлений технической политики РФ [1].

Целью работы является анализ технических показателей компактных линий электропередачи напряжением 220 кВ.

На рис. 1 показаны одноцепная компактная трехфазная ВЛ (ОКВЛ) и двухцепная компактная ВЛ (ДКВЛ).

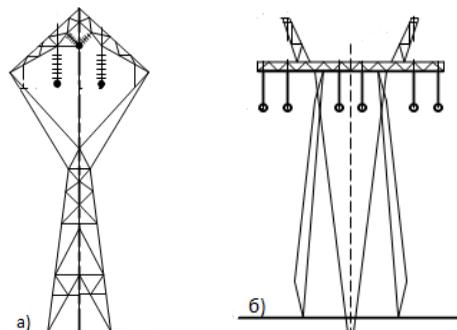


Рис. 1. Варианты компактных воздушных линий: а – одноцепная трёхфазная ВЛ; б – двухцепная компактная ВЛ

Основными электрическими параметрами ВЛ-220 кВ нового поколения, как и ВЛ традиционного типа, являются: удельное активное сопротивление, удельное индуктивное сопротивление, удельная емкостная проводимость. Указанные параметры определяют величину натуральной мощности, которой удобно пользоваться для сопоставления различных вариантов и типов ВЛ на стадии выбора предпроектных решений [2].

В таблице 1 приведены параметры и характеристики рассматриваемых вариантов ВЛ-220 кВ, а также дополнительные характеристики, которые могут приниматься во внимание при выборе вариантов ВЛ.

Таблица 1. Технические параметры ВЛ нового поколения

Тип ВЛ	Одноцепная компактная	Двухцепная компактная	
Число цепей	1	2	
Марка провода	АС-300/66		
Число проводов в фазе	2	2	
Удельные параметры линии	r_0 , Ом/км	0,0511	0,049
	x_0 , Ом/км	0,236	0,262
	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	4,66	4,32

Тип ВЛ	Окончание табл. 1	
	Одноцепная компактная	Двухцепная компактная
Волновое сопротивление, Ом	226,4	123,7
Натуральная мощность, МВт	277,9	509,0
Удельная зарядная мощность, МВАр/км	0,296	0,548
Ширина коридора L_k , м	43,0	60,7
Стоимость одного километра в расчете на 1 МВт, тыс.руб./МВт	5,93	5,13

Приведенные данные показывают, что при принятых сопоставимых условиях ВЛ-220 кВ нового поколения по величине натуральной мощности превосходят аналогичные ВЛ-220 кВ (одноцепные и двухцепные традиционного типа) в 1,5 – 2 раза.

Расчетные данные свидетельствуют и о том, что двухцепные компактные ВЛ-220 кВ по величине натуральной мощности приближаются к одноцепным трехфазным ВЛ-500 кВ обычного типа.

Проведенные предварительные технико-экономические сопоставления показали, что удельные капитальные вложения, необходимые для двухцепных не превышают величину удельной стоимости одноцепных ВЛ-500 кВ традиционной конструкции.

Рассмотренные варианты ВЛ-220 кВ нового поколения могут найти применение в проектах развития электрических сетей.

Библиографический список

1. **Положение** ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. Утверждено Советом директоров ОАО «Россети» 23.10.2013.
2. **Постолатий В.М.**, Суслов В. М. Теоретические аспекты выбора оптимальных параметров конструкций линий электропередачи переменного тока нового поколения // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – № 1.

П.Н. Беляев, студ.;
рук. А.А. Братолобов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛНОТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЭС НА ОЦЕНКУ ЕЁ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

При исследовании статической устойчивости ЭЭС возникает проблема соотношения детализации математических моделей и корректности получаемых результатов. Важно определить оптимальное соотношение между простотой и адекватностью моделей.

Известно, что для простейшей ЭЭС, представляющей собой генератор, работающий на шины бесконечной мощности, можно записать уравнение ротора генератора в двух формах, без учёта коэффициента демпфирования D (уравнение 1), и с учётом такового (уравнение 2).

$$T_J p^2 \Delta \delta + \frac{dP}{d\delta} \Delta \delta = 0, \quad (1)$$

$$T_J p^2 \Delta \delta + D p \Delta \delta + \frac{dP}{d\delta} \Delta \delta = 0. \quad (2)$$

Согласно теореме Ляпунова об устойчивости в первом приближении [1], корни характеристического уравнения должны иметь отрицательные действительные части. В первом уравнении корни имеют чисто мнимое значение, а значит, о статической устойчивости судить невозможно. Второе же, пусть чуть более сложное, учитывает демпфирующий коэффициент, что дает возможность получить корни с действительной частью и сделать выводы об устойчивости.

При оценке статической устойчивости ЭЭС, часто применяется упрощенное представление АРВ-СД генератора по структурной схеме, содержащей идеальные дифференцирующие звенья. Передаточная функция при этом имеет следующий вид:

$$\Delta E_{qe} = \frac{1}{1 + T_e p} \cdot (-k_{ou} \Delta U + k_1 p x + k_2 p^2 x), \quad (3)$$

где k_{ou} – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора; k_1, k_2 – коэффициенты регулирования по первой и второй производным входной величины x , которая может изменяться скачком.

Согласно критерию Жданова [2], для оценки аperiodической статической устойчивости необходимо выполнение условия $\frac{a_0}{a_n} > 0$.

При таком упрощенном моделировании АРВ-СД в случае простейшей ЭЭС, коэффициент a_0 принимает следующий вид:

$$k_2 \frac{T_y}{314} \frac{\partial I}{\partial E_q} - \frac{T_y}{314} T_e T_v \frac{\partial E_q'}{\partial E_q} \quad (4)$$

Данный результат является некорректным, поскольку коэффициент k_2 регулирования по второй производной параметра не может влиять на аperiodическую устойчивость.

Если же применить более полную модель АРВ-СД, содержащую звено реального дифференцирования с постоянными времени T_d :

$$\Delta E_{qe} = \frac{1}{1 + T_e p} \cdot (-k_{ou} \Delta U + \frac{k_1 p}{1 + T_d p} x + \frac{k_2 p^2}{(1 + T_d p)^2} x), \quad (5)$$

то выражение коэффициента a_0 уже не содержит k_1 , k_2 коэффициенты регулирования по производным.

$$- \frac{T_y}{314} T_e T_v T_d^2 \frac{\partial E'_q}{\partial E_q} \quad (6)$$

Следовательно, математическая модель становится достаточно полной (порядок характеристического уравнения несколько возрастает), а результаты расчетов – корректными.

Таким образом, при упрощении математических моделей всегда следует учитывать возможность потери данной моделью адекватности.

Библиографический список

1. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. – М.: Наука, 1966. – 533 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ЭЭС

Согласно методическим указаниям по устойчивости для надёжной работы энергосистем необходимо обеспечивать отсутствие самораскачивания, а также запас статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки[1]. Однако в настоящее время у организаций, осуществляющих проектирование и эксплуатацию энергосистем, нет специализированных программно вычислительных комплексов (ПВК), которые позволяли бы оценивать статическую устойчивость с учётом самораскачивания, а также устойчивость узлов нагрузки.

В то же время, такие организации имеют доступ к ПВК, позволяющим производить расчёт электромеханических переходных процессов (например, MUSTANG, EUROSTAG и др.), поэтому целесообразно их использование для оценки не только динамической, но и статической устойчивости.

Идея анализа статической устойчивости методом численного интегрирования нелинейных уравнений ЭЭС состоит в том, что по характеру

переходного процесса, вызванного малыми возмущающими воздействиями, можно судить о статической устойчивости системы. При этом возможно совмещение задач оценки статической устойчивости и утяжеления режима [2].

Целью данной работы является исследование возможности применения упомянутых ПВК для анализа статической устойчивости с учётом самораскачивания, а также устойчивости нагрузки.

На рисунке 1 показано непрерывное динамическое утяжеление режима простейшей ЭЭС. В качестве возмущающего воздействия рассматривается ступенчатое увеличение мощности турбины генератора, устойчивость оценивается по характеру изменения угла ротора турбины. В первом случае (рис. 1, а) наблюдается нарушение колебательной устойчивости, выражающееся в постоянно увеличивающихся по амплитуде периодических колебаний угла ротора. Во втором случае (рис. 1, б) устойчивость нарушается аperiодически, нарушение синхронной работы генератора происходит при $\delta > 360^\circ$. Предельному по устойчивости режиму в первом случае соответствует мощность турбины $P_{пр.1} = 240$ МВт, во втором $P_{пр.2} = 390$ МВт.

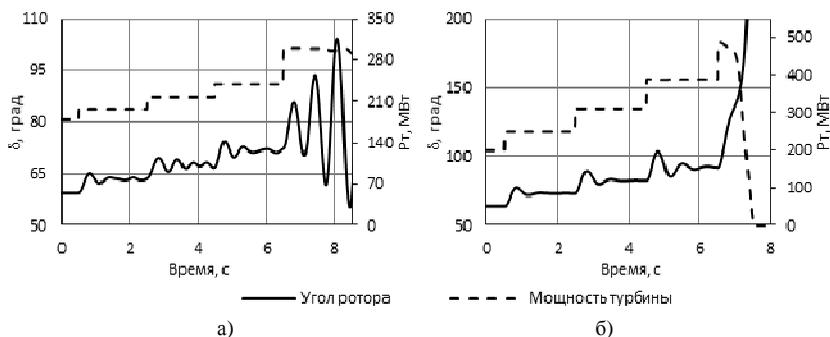


Рис. 1. Графики изменения угла ротора δ и мощности турбины генератора при неправильной (а) и правильной (б) настройке АРВ генератора

Анализ устойчивости нагрузки также производится по виду переходного процесса, вызванного неким возмущающим воздействием. В качестве такого воздействия задаётся постепенное снижение напряжения в рассматриваемом узле. Для нагрузки в виде асинхронного двигателя устойчивость оценивается по кривой скольжения (рис. 2, а), устойчивость узла с синхронным двигателем определяется по графику угла ротора двигателя (рис. 2, б). При этом, нарушение устойчивости в случае с АД происходит при напряжении меньше, чем $U_{кр} = 6,5$ кВ; для узла с СД $U_{кр} = 7,8$ кВ.

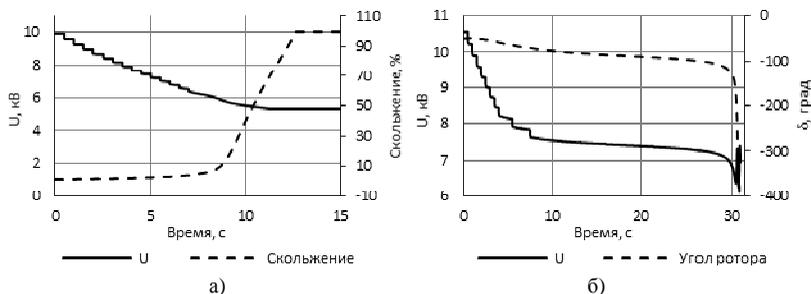


Рис. 2. Графики скольжения АД (а) и изменения угла ротора СД (б) при снижении напряжения в узле нагрузки

Библиографический список

1. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. СО 153-34.20.576-2003. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
2. **Братолобов А.А.**, Огорельшев Н.А., Аржанникова А.Е. Применение ЭВМ в учебных расчётах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем: учебное пособие / ГОУПВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2006. – с.

В.А. Новиков, Д.С. Виноградова, студ.;
рук. И.Е. Иванов, асс.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЁХФАЗНЫХ ДВУХЦЕПНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА БАЗЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Проблеме определения фактических параметров высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) посвящено достаточно большое количество публикаций последних лет [1 – 3]. *Актуальность* задачи обусловлена тем, что реальные параметры ВЛЭП могут существенно отличаться от рассчитанных по традиционной методике и, более того, варьируются в зависимости от режима работы и погодных условий [1]. Поэтому алгоритмы устройств защиты и автоматики, использующие информацию о параметрах ВЛЭП (например, «классическое» определение места повреждения), могут иметь входные данные, не отражающие фактический режим. То же справедливо и в отношении т.н. алгоритмов оценивания состояния режима сети. Можно выделить и другие прикладные задачи, опирающиеся на наличие актуальной информации о параметрах ВЛЭП

[4]. Постоянное увеличение количества устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) в энергосистемах потенциально позволяет уточнять параметры ВЛЭП практически в режиме реального времени. *Целью настоящего исследования* является разработка и верификация алгоритма идентификации фактических параметров двухцепной ВЛЭП на основе СВИ токов и напряжений (рис. 1). *Методом исследования* является математическое моделирование. Все стадии вычислительных экспериментов реализованы в программном обеспечении MATLAB.

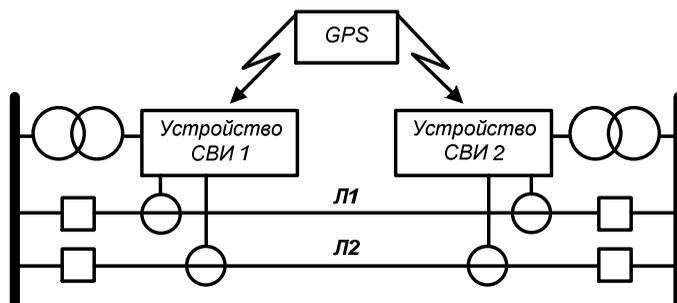


Рис. 1. Принципиальная схема организации СВИ напряжений и токов с обеих сторон двухцепной ВЛЭП (в однолинейном варианте)

Напряжения и токи n -проводной ВЛЭП на одной частоте связаны между собой следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} -\left[\frac{d\dot{\mathbf{U}}}{dx}\right] &= [\mathbf{Z}][\dot{\mathbf{i}}]; \\ -\left[\frac{d\dot{\mathbf{i}}}{dx}\right] &= [\mathbf{Y}][\dot{\mathbf{U}}], \end{aligned} \quad (1)$$

где $[\dot{\mathbf{U}}]$ – вектор-столбец фазных напряжений; $[\dot{\mathbf{i}}]$ – вектор-столбец фазных токов; $[\mathbf{Z}]$ и $[\mathbf{Y}]$ – квадратные матрицы сопротивлений и проводимостей соответственно.

Эффективным методом решения уравнений в форме (1) является фазо-модальное преобразование [5]. Поскольку для осуществления преобразования необходимо знать элементы матриц $[\mathbf{Z}]$ и $[\mathbf{Y}]$, которые не известны, решить задачу можно только с помощью нелинейной оптимизации подобно тому, как это выполнено в [5]. При этом, как и в [5], оптимизация осуществляется не относительно самих сопротивлений и прово-

димостей, а относительно существенно меньшего числа неизвестных, описывающих геометрию ВЛЭП и физические свойства системы проводников, и затем рассчитываются матрицы $[Z]$ и $[Y]$.

Вычислительные эксперименты, выполненные с привлечением данных с реальных регистраторов СВИ, свидетельствуют о перспективности разработанного алгоритма.

Библиографический список

1. **Бартоломей П.И.**, Ерошенко С.А., Лебедев Е.М., Суворов А.А. Новые информационные технологии обеспечения наблюдаемости FACTS на основе измерений PMU // Электроэнергетика глазами молодёжи: сб. науч. тр. III междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 2. – С. 17 – 23.
2. **Liao Y.**, Kezunovic M. Online optimal transmission line parameter estimation for relaying applications // IEEE Trans. Power Del. – Vol. 24. – No. 1. – Pp. 96 – 102. – January 2009.
3. **Kim H-D.**, Aggarwal R.K. A study on the on-line measurement of transmission line impedances for improved relaying protection // Electrical Power and Energy Systems. – Vol. 28. – No. 6. – Pp. 359 – 366. – July 2006.
4. **Небера А.А.** Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима // «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 2011.
5. **Иванов И.Е.**, Мурзин А.Ю. Идентификация параметров одноцепной линии электропередачи на основе синхронизированных векторных измерений // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. – Сочи, 2015.

И.Д. Журавлев, студ.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗВИТИЕ АВТОМАТИКИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КОСТРОМСКОЙ ГРЭС

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) Костромской ГРЭС является одной из основных систем противоаварийной автоматики ОЭС Центра, назначением которой является предотвращение нарушения статической и динамической устойчивости функционирования энергосистемы.

АПНУ Костромской ГРЭС включает в себя следующие подсистемы: автоматику разгрузки при близких коротких замыканиях (АРБКЗ) и автоматику разгрузки при затянувшихся коротких замыканиях (АРЗКЗ), реализованных в виде системы фиксации тяжести коротких замыканий

(ФТКЗ), а также автоматику разгрузки при отключении одной или двух линий электропередачи (ЛЭП) 500 кВ (АРОЛ, АРОДЛ), выполненных в виде устройств фиксации отключения ЛЭП (ФОЛ). Выбор вида управляющего воздействия (УВ) и расчет его величины производит локальная автоматика дозировки воздействий (ЛАДВ), представляющая из себя микропроцессорное устройство, сигналы от которого поступают на вход автоматики разгрузки станции (АРС), реализующей выбранные УВ. В АПНУ предусмотрены следующие УВ: кратковременная разгрузка турбин (КРТ) блоков станции, работающих на шины 500 кВ, для предотвращения нарушения динамической устойчивости; длительная разгрузка турбин (ДРТ) этих же блоков станции с целью предотвращения нарушения статической устойчивости и ликвидации перегрузки контролируемых сечений энергосистемы; отключения генератора (ОГ) блока № 9 установленной мощностью 1200 МВт для предотвращения нарушения устойчивости, ограничения повышения частоты в энергосистеме и ликвидации перегрузки контролируемых сечений.

До 2015 года в составе АПНУ существовал также резервный комплекс релейной автоматики дозировки воздействий (РАДВ), который в силу физического и морального старения оборудования был ликвидирован. При этом выбор УВ и расчет необходимой величины разгрузки станции осуществлялся ЛАДВ по специальному алгоритму с использованием коэффициентов полинома, определяемых заранее для каждого режима энергосистемы. Однако в результате пересмотра алгоритмов ЛАДВ в связи с введением нового стандарта ГОСТ Р 55105-2012, а также изменением перетоков мощности в контролируемых сечениях были произведены расчеты устойчивости с использованием нового программно-технического комплекса ОДУ Центра. По результатам расчетов было принято решение использовать в алгоритме выбора вида и величины УВ для пусковых органов АРБКЗ и АРЗКЗ информацию о параметрах режима, предшествующего аварийному возмущению. Контроль предшествующего режима (КПР) реализован в виде датчиков мощности, установленных на каждом из блоков Костромской ГРЭС, работающих на шины 500 кВ.

В конце 2015 года была введена в работу новая ЛЭП 500 кВ КГРЭС – Нижегородская. В результате этого изменились перетоки мощности в контролируемых сечениях энергосистемы. Расчеты устойчивости, которые были произведены для новой электрической схемы энергосистемы показали, что в нынешних условиях обеспечивается большой запас статической устойчивости. Это привело к пересмотру алгоритмов выбора УВ при срабатывании устройств ФОЛ. От алгоритма, формирующего УВ с использованием полиномиальной зависимости, было решено отказаться

в пользу более «простого» варианта: ввод ФОЛ в работу теперь осуществляется по указанию диспетчера ОДУ Центра, вид и величина УВ также задается диспетчером ОДУ Центра в зависимости от текущего электроэнергетического режима энергосистемы. Также по решению ОДУ Центра к уже существующим устройствам ФОЛ ЛЭП 500 кВ, присоединенных к Костромской ГРЭС, были добавлены ФОЛ еще четырех смежных транзитных ЛЭП 500 кВ. В результате анализа расчетов динамической устойчивости узла Костромской ГРЭС, проведенных ОДУ Центра, с учетом появления новой ЛЭП было установлено, что в нормальной схеме при коротком замыкании (КЗ) в электрической сети 500 кВ, прилегающей к Костромской ГРЭС, не происходит нарушение динамической устойчивости. С учетом этого существующий алгоритм работы при срабатывании ФТКЗ был дополнен сигналами фиксации ремонта линий 500 кВ, вывод в ремонт которых в сочетании с КЗ может привести к нарушению динамической устойчивости. Фиксация ремонта ЛЭП 500 кВ, присоединенных к Костромской ГРЭС, осуществляется от устройств ФОЛ, а фиксация ремонта смежных линий в сети 500 кВ осуществляется в соответствии с информацией, переданной по каналам устройства передачи аварийных сигналов и команд (УПАСК).

С учетом гибкости и универсальности устройства АПНУ, функционирующего на Костромской ГРЭС, в будущем планируется дополнить подконтрольные АПНУ сечения линиями 220 кВ.

М.В. Зотова, Е.В. Смирнов, А.Г. Смирнова, студ.;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

НОРМАЛЬНЫЕ И АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ЭКРАНОВ ОДНОФАЗНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

В последнее время силовые кабели напряжением 6 – 500 кВ всё более широко используются для передачи и распределения электроэнергии [1]. Наибольшее распространение получили однофазные экранированные силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Для снижения напряжения на экране выполняется его заземление в одной или нескольких точках. Способ заземления экрана кабеля влияет на величину напряжения на экране в разных режимах, на погонные электрические параметры кабеля и на величину тока в экране [2].

Для расчета установившихся режимов и токов короткого замыкания в программном комплексе Matlab разработана математическая модель высоковольтной КЛ, состоящая из трех одножильных экранированных кабелей с изоляцией из СПЭ. В данной работе рассматривается вопрос выбора схемы соединения и заземления экранов с целью снижения токов в них в нормальном симметричном и аварийных режимах работы кабеля, а также анализ допустимости той или иной схемы с точки зрения уровня напряжения в узлах транспозиции или на разомкнутом конце экрана.

В качестве примера рассмотрена система из трех однофазных кабелей 500 кВ с изоляцией из СПЭ марки 2XS(FL)2Y 1x800RM/50 290/500 кВ длиной 10 км. Из результатов расчета нормального режима получили, что наиболее подходящей схемой является схема с транспозицией экранов, для которой далее произведен анализ аварийных режимов.

Говоря о коротком замыкании в однофазном кабеле и выборе сечения экрана, полагается повреждение изоляции «жила-экран». В аварийных режимах наибольшие токи в экранах появляются именно при коротких замыканиях в самом кабеле. При внутреннем повреждении изоляции «фаза-экран» кабеля ток короткого замыкания $I_{кз}$ из жилы попадает в экран и далее в заземляющее устройство экрана, то есть протекает по экрану. Если сечение экрана не соответствует величине тока $I_{кз}$ и длительности его протекания, то возможно термическое разрушение экрана на значительном отрезке кабеля.

При транспозиции экранов максимальное значение напряжения на экранах относительно земли достигается в узлах транспозиции и должно быть меньше испытательного для оболочки кабеля. Перед вводом в эксплуатацию и далее уже в процессе эксплуатации оболочку кабелей 6 – 500 кВ испытывают постоянным напряжением 10 кВ в течение 1 мин. Для оболочек кабелей 6 – 500 кВ на время короткого замыкания в сети допустимо напряжение промышленной частоты, действующее значение которого составляет 5 кВ [3]. Если при внешнем по отношению к кабелю коротком замыкании в сети на оболочку воздействует напряжение, большее 5 кВ, то становится ощутимым риск пробоя оболочки. При полученном значении напряжения на экране ОПН на рассматриваемую кабельную линию не требуется.

Таким образом, в однофазных кабелях высокого напряжения с изоляцией их сшитого полиэтилена необходимо предъявлять повышенное внимание к выбору способа заземления экранов и проводить обосновывающие расчеты в нормальном симметричном и аварийных режимах работы.

Библиографический список

1. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных кабелей 6 – 500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010.

2. **Дмитриев М.В.**, Евдокунин Г.А. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения // Новости электротехники. – 2007. – № 2 (44).

3. **Стандарт** организации ОАО «ФСК ЭЭС». Силовые кабельные линии напряжением 110 – 500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. – М.: ОАО «ФСК ЭЭС», 2011.

*А.А. Комухов, М.С. Кустикова, студ.,
И.А. Москвин, к.т.н.;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.,
В.П. Голов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЛИЯНИЕ УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ С ТИРИСТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ¹

С каждым годом мировое потребление электроэнергии увеличивается. Зачастую электростанции находятся на большом расстоянии от крупных центров электропотребления, поэтому линии электропередачи имеют большую протяженность. Для передачи по линиям большого количества электроэнергии без нарушения устойчивости во всем мире применяются активно-адаптивные устройства. Такие устройства относятся в группе FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems).

Среди известных устройств, повышающих пропускную способность линий электропередачи, наибольшее применение в мире к настоящему времени нашли тиристорные устройства продольной компенсации (ТУПК) [1]. Эти устройства работают на основе схемы, предусматривающей регулирование тока в реакторе с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров, получившей в англоязычной литературе название Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC). Поскольку тиристоры имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, управляемое устройство искажает форму кривой напряжения в сети.

Одним из основных мероприятий, направленных на улучшение формы кривой напряжения, является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Такие устройства представляют собой L-C цепочки, включенные в сеть и специально настроенные на подавление конкретных гармоник.

В данной работе рассмотрен район Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 1), где в многоводный период возникает проблема «запертой» мощности (станция не может работать на полную мощность, так как пропускная

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГЗ № 2014/41; код проекта: 2915).

способность прилегающих линий недостаточна). Наиболее эффективным мероприятием по увеличению статической устойчивости в энергосистеме района является использование управляемой продольной компенсации на электропередаче 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая.



Рис. 1. Фрагмент сети 220 – 500 кВ региона Саяно-Шушенской ГЭС

В программном комплексе MATLAB с использованием графической среды Simulink был смоделирован рассматриваемый участок. Модель содержит эквивалентный генератор, трансформатор, ВЛ 500 кВ СШ ГЭС – Новокузнецкая, устройство продольной компенсации с тиристорным управлением, шунтирующие реакторы, фильтрокомпенсирующее устройство, шины бесконечной мощности (рис. 2). Все элементы схемы являются моделями реального оборудования района.

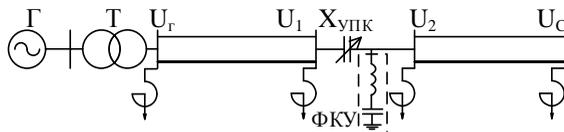


Рис. 2. Схема исследуемой электроэнергетической системы

В работе проанализировано влияние ТУПК на синусоидальность кривой напряжения. Исследование показало, что при использовании компенсирующего устройства без ФКУ значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения выходит за нормально допустимое, определенное ГОСТ 13109-97. Целесообразно применение фильтров, подавляющих 5,9,13 гармоники.

Библиографический список

1. Голов В.П., Мартиросян А.А. Влияние законов регулирования устройств продольной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2003. – Вып. 5. – С. 41 – 44.

2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.

3. Устройство продольной компенсации с тиристорным управлением / А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Комухов [и др.] // Вестник РНК СИГРЭ. – 2014. – Вып. 4. – С. 110 – 115.

Д.Н. Кормилицын, асп.;
рук. В.П. Голов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

В известных работах по исследованию устойчивости простейших электроэнергетических систем, содержащих управляемые устройства компенсации, исследуется влияние только одного типа устройств на устойчивость [1, 2]. Однако совместное влияние управляемых устройств продольной и поперечной компенсации на устойчивость электроэнергетической системы также представляет интерес.

Произведена оценка влияния совместного регулирования управляемого устройства продольной компенсации (УУПК) и управляемых шунтирующих реакторов (УШР), установленных на его выводах. Проведенные исследования показывают, что совместное регулирование параметров УУПК и УШР позволяет увеличить пропускную способность линии электропередачи, оснащенную подобными устройствами при положительном влиянии на статическую апериодическую и динамическую устойчивость системы.

При использовании регулируемого УПК не наблюдается колебательного нарушения устойчивости во всех возможных режимах и диапазонах регулирования со степенью компенсации, применяемой при эксплуатации ЭЭС при соответствующем выборе законов управления УПК.

Предложена методика расчета диапазона изменения параметров регулирования УУПК и УШР, при которых наблюдается положительный эффект влияния данных устройств на устойчивость исследуемой ЭЭС, а именно увеличение предела передаваемой мощности, улучшение апериодической статической устойчивости, и отсутствует отрицательное влияние, т.е. не наблюдается колебательного нарушения устойчивости ЭЭС, вызванного самим законом регулирования УПК.

Библиографический список

1. **Фокин, В.К.** Повышение выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС с помощью емкостной компенсации на линии СШ ГЭС – «Новокузнецкая», «Кузбасская» / В.К. Фокин // Энергия единой сети. – 2013. – № 2 (7). – С. 66 – 73.
2. **Масленников В.А., Устинов С.М.** Динамические свойства и статическая устойчивость дальних электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами// Изв. РАН Энергетика. – 1999. – № 3. – С. 6878.
3. **Научные** исследования кафедры электроэнергетических систем / И.И. Карташев, В.А. Стров, Ю.В. Шаров // Вестник МЭИ. – 2014. – № 1. – С. 30 – 34.

М.И. Кравченко, студ.;
рук. И.А. Москвин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ
 ЭЛЕМЕНТЫ АКТИВНО-АДАПТИВНОЙ СЕТИ**

В настоящее время повышение эффективности функционирования энергетических систем ведущих мировых стран осуществляется за счет развития и широкого внедрения активно-адаптивных электрических сетей. Электрическая сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в реальном времени в зависимости от режима работы энергосистемы. Одной из важных задач электроэнергетики является исследование устойчивости электрических систем, содержащих элементы активно-адаптивной сети. Необходимость такого исследования подтверждается также наметившейся тенденцией широкого практического применения данных устройств в ЕЭС России в ближайшей перспективе [1].

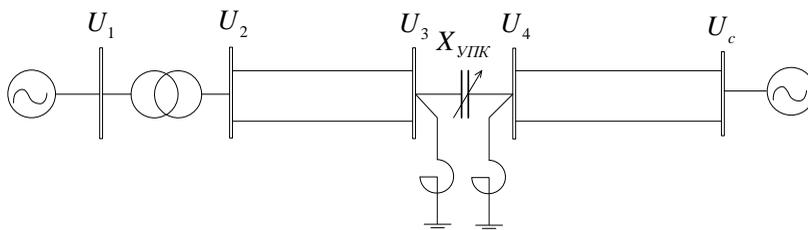


Рис. 1. Схема исследуемой ЭЭС

Для электроэнергетической системы простой структуры сформирована математическая модель в программном комплексе MATLAB.

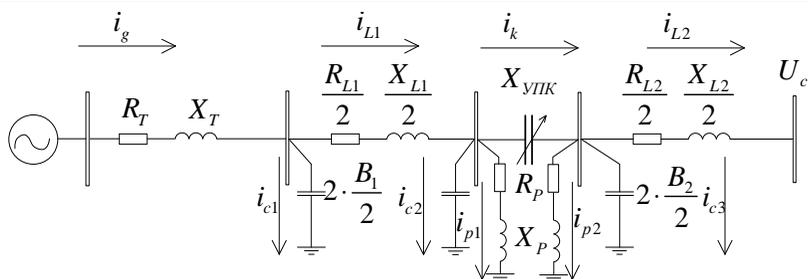


Рис. 2. Схема замещения исследуемой ЭЭС

При исследовании переходных процессов в электроэнергетических системах синхронные машины описываются уравнениями Парка–Горева в прямоугольной системе координат d и q , неподвижной относительно ротора. В итоге, получена система дифференциально-алгебраических уравнений, описывающих переходный процесс в каждом элементе электроэнергетической системы.

В планируемое исследование входит рассмотрение различных законов регулирования параметров устройства продольной компенсации в зависимости от режима работы энергосистемы.

Целью данной исследовательской работы является выявление оптимального закона регулирования параметров устройства продольной компенсации.

Библиографический список

1. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач // Электричество. – 2013. – № 12.

*М.С. Кустикова, А.А. Комухов, студ.,
И.А. Москвин, доц.;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.,
В.П. Голов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА

В последние годы качеству электроэнергии и надежности систем электроснабжения уделяется большое внимание. Параметры режима в большей степени зависят от работы крупных промышленных предприятий. При резко

неоднородной нагрузке значения напряжения могут выходить за допустимые пределы. От напряжения на шинах подстанции, питающей крупную фабрику или завод, зависит качество производимой продукции. Поэтому необходимо поддерживать напряжение в требуемом диапазоне.

Уровень напряжения связан с балансом реактивной мощности. Обеспечить стабильное напряжение даже при резком изменении нагрузки возможно путем потребления или генерации реактивной мощности вблизи крупного предприятия. Наиболее эффективным устройством, позволяющим плавно регулировать напряжение в узле, является статический тиристорный компенсатор (СТК). Он относится к устройствам поперечной компенсации, устанавливаемым в сетях высокого напряжения и предназначенным для повышения качества электроснабжения. При использовании этого устройства вблизи предприятия с мощными дугowymi электросталеплавильными печами сокращается время цикла плавки, снижаются расходы на электроды, существенно уменьшается эффект фликера. Такое устройство за рубежом уже широко применяется и только начинает внедряться в России [1].

На промышленных предприятиях широко используется оборудование, эксплуатация которого приводит к появлению в сети гармонических искажений. Помимо этого, тиристоры в СТК также генерируют нежелательные гармоники. Наличие гармонических искажений приводит к сбоям в работе систем телемеханики, связи, автоматики, росту активных потерь во всех элементах электрооборудования. Для решения этих проблем необходимо применение фильтрокомпенсирующих установок (ФКУ).

В среде Simulink была собрана схема участка электроэнергетической системы, включающая генератор, линию электропередачи, нагрузку, статический тиристорный компенсатор, фильтрокомпенсирующее устройство (рис. 1).

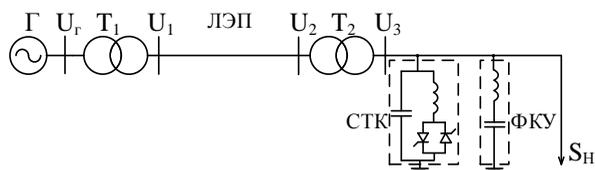


Рис. 1. Схема исследуемой электроэнергетической системы

С помощью данной модели рассмотрены различные режимы работы управляемого устройства. Проведено исследование влияния СТК на скорость затухания переходных процессов при таких возмущениях, как короткое замыкание и резкий небаланс активной мощности. Рассчитаны потери активной мощности в сети.

Определена требуемая мощность оборудования, входящего в состав СТК. Рассчитан срок окупаемости устройства. В качестве источника окупаемости было взято снижение затрат на потери активной мощности в элементах сети.

Библиографический список

1. **Карымов Р.Р.**, Ебадиан М.Ю. Применение СТК на базе управляемых шунтирующих реакторов с коммутируемой внешней конденсаторной батареей для повышения устойчивости асинхронной нагрузки // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. двенадцатой междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ. – 2006. – С. 330 – 331.

2. **Калентнюк Е.В.**, Файбисович В.А. Автоматическое управление режимом энергосистемы по напряжению в условиях аварийного дефицита реактивной мощности // Энергетика. Известия высш. учебных заведений СССР. – 1984. – № 5. – С. 44 – 46.

3. **Бернас С.**, Цяк Э. Математические модели элементов электроэнергетических систем. – М.: Энергоиздат, 1982. – 313 с.

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

ПРОБЛЕМА НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ОТКЛЮЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ

Уже более нескольких десятков лет правила безопасности проведения работ на ВЛ под наведенным напряжением неоднократно уточняются. Однако проблема безопасности при работах такого вида еще не решена. Практика показывает, что после выхода правил [2] только по причине наведенного напряжения погибло более 15 человек [1].

По мнению автора одной из причин сложившегося уровня электротравматизма является тот факт, что действующие нормы не регламентируют учет возможных случаев возникновения аварийных режимов, включая КЗ, на влияющих ВЛ. Время существования наведенных напряжений в отключенных для ремонта ВЛ при таких режимах определяется длительностью протекания тока КЗ, т.е. в пределах 0,1 – 5 с. Такие режимы могут возникать достаточно часто. Например, в системе Нижновэнерго на ВЛ 110 кВ зафиксировано порядка 150 – 200 коротких замыканий в течение года [3].

В данной работе был рассмотрен случай появления наведенного напряжения на ВЛ 110 кВ при коротком замыкании на влияющей линии 500 кВ. Приближенная модель для данного случая может быть воссоздана с помощью программного комплекса MatLab в пакете расширений Simulink (рис. 1).

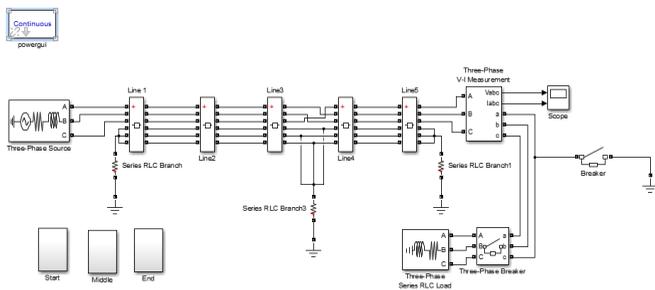


Рис. 1. Модель ВЛ под наведенным напряжением в MatLab

При появлении короткого замыкания на влияющей линии, уровень наведенного напряжения в отключенной линии (рис. 2), в месте транспозиции фаз влияющей линии, резко увеличивается и превышает допустимые нормы [4].

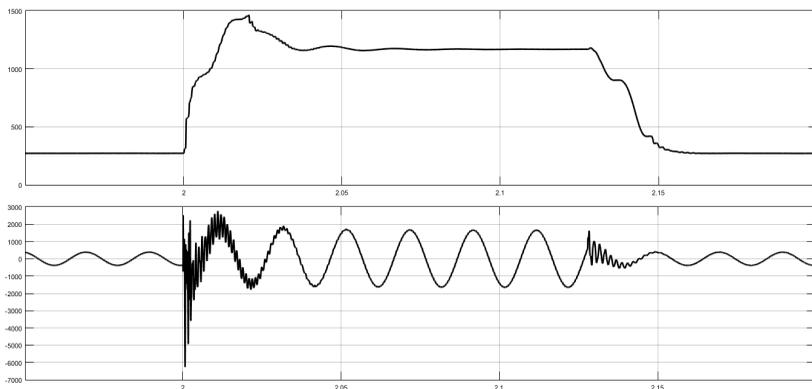


Рис. 2. Мгновенное и действующее значения наведенного напряжения при КЗ во влияющей линии

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения при аварийном режиме не должны превышать 340 В при длительности 0,1 секунды [4]. Действующее значение в нашем случае в среднем составило 1200 В в течение 0,1 секунды, что недопустимо.

Полученные данные подтверждают необходимость учета возможных аварийных режимов на влияющих линиях при составлении списка ВЛ, требующих дополнительных мер безопасности, для работ под наведенным напряжением.

Библиографический список

1. **Вантеев А.И.** Вопросы безопасной организации работ на воздушных линиях электропередачи // Приложение к журналу «Энергетик». – 2014. – № 4.
2. **Межотраслевые** правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. С изменениями и дополнениями. ПОТ РМ-016–2001. РД 153-34.0-03.150-00. – М.: ЗАО «Изд-во НЦ ЭН АС», 2003.
3. **Тураев В. А.,** Базанов В. П. О наведенных напряжениях на воздушных линиях при однофазных коротких замыканиях // Электрические станции. – 1998. – №3.
4. **ГОСТ 12.1.038-82** Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. 2001.

*А.В. Сидоров;
рук. И.А. Москвин, к.т.н.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СОЗДАНИЕ ПРОГРАММЫ WIN_SSS

Своевременное обновление программного обеспечения для обучения студентов является актуальной задачей в наше время. Программы, которые были созданы относительно давно, следует обновлять по нескольким причинам – совместимость с операционными системами, удобство и простота использования.

Одной из программ, которую необходимо обновить оказалась программа для выполнения лабораторных работ по курсу «Электромеханические переходные процессы».

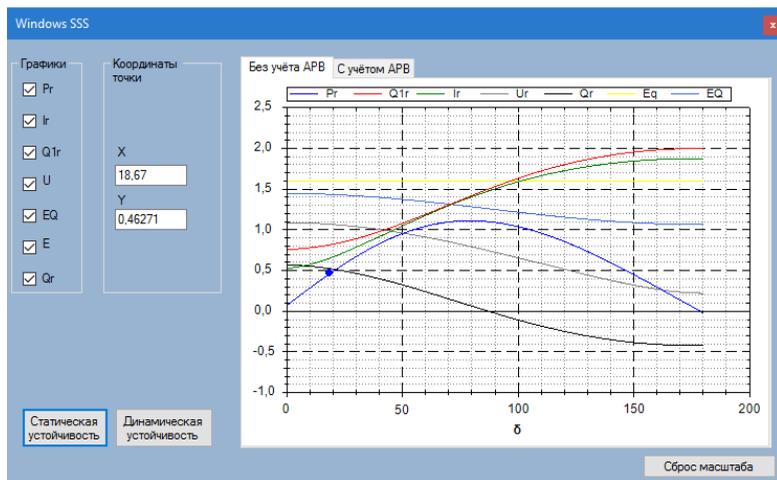


Рис. 1. Представление графиков в программе WIN_SSS

Необходимо было выбрать язык программирования для реализации задачи. Им оказался Microsoft.NET C# – актуальный в текущее время объектно-ориентированный язык, визуальное оформление в котором выполняется через так называемые формы, которые знакомы и интуитивно понятны всем пользователям операционной системы Windows.

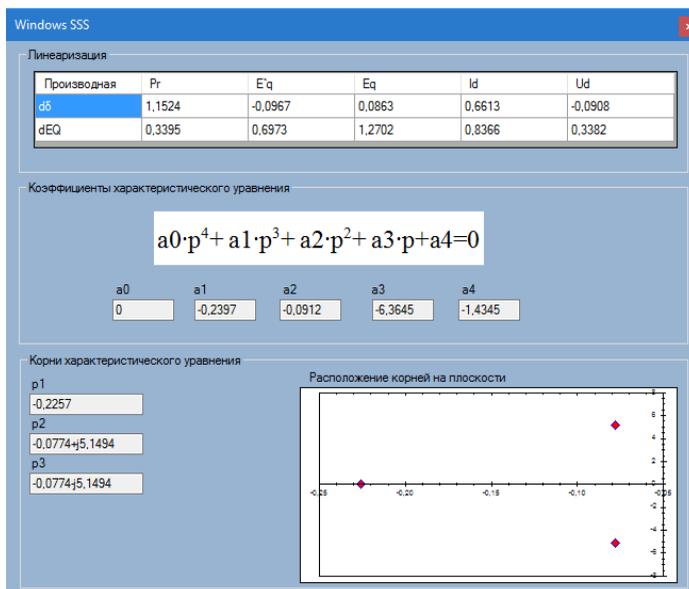


Рис. 2. Результаты расчёта (линеаризация уравнений, расчет корней характеристического уравнения, изображение корней на комплексной плоскости)

Работа над разработкой приложения длится уже более трёх месяцев. За это время была выполнена большая часть в плане работы над реализацией различных возможностей: уже можно полноценно выполнять несколько лабораторных работ, добавлена возможность автоматического создания отчёта, сохранения в отдельный файл данных программы и последующая возможность их загрузки.

Доработок требует визуальная составляющая, работа над которой является приоритетной задачей.

Библиографический список

1. **Братолобов А.А.**, Огорельшев Н.А., Аржанникова А.Е. Применение ЭВМ в учебных расчетах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем, 2006.
2. **Братолобов А.А.**, Голов В.П. Исследование статической модели устойчивости на математической модели ЭЭС, 2004.

П.Е. Фирстов, студ.;
А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЭЛЕКТОРОПЕРЕЧАХ ОТ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

В результате роста электрических нагрузок и сопутствующему укрупнению электроэнергетических систем все актуальнее становятся проблемы, связанные с надежной и безаварийной работой единой энергетической системы страны. Ввод новых генерирующих мощностей и расширение электрических сетей требует применения средств для повышения пропускной способности электропередачи и обеспечения устойчивой параллельной работы генераторов.

На данный момент существует большое количество мероприятий способствующих увеличению пропускной способности электропередачи и устойчивости электроэнергетической системы в целом. В мировой практике, в качестве одного из таких мероприятий, хорошо зарекомендовали себя устройства продольной компенсации с тиристорным управлением (УПКТУ). Данное устройство относится к устройствам FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). Благодаря встречно-параллельной схеме включения тиристоров в устройстве, обеспечивается плавное регулирование степени компенсации индуктивного сопротивления линии электропередачи [1].

Целью данной работы является оценка влияния закона регулирования УПКТУ на уровни токов при коротких замыканиях (КЗ) на линии электропередачи. В работе выполнено математическое моделирование электроэнергетической системы, в составе которой содержится УПКТУ (рис. 1).

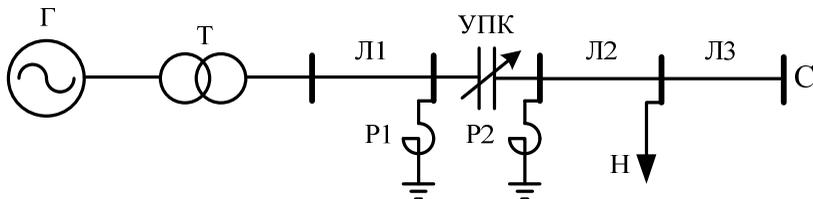


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

Расчеты произведены с использованием библиотеки блоков SimPowerSistems графической среды Simulink программного комплекса

MATLAB [2]. Определены значения токов по концам линий электропередачи при возникновении различных видов КЗ на ЛЭП. На основе анализа результатов расчетов выявлена зависимость изменения токов КЗ от закона регулирования ёмкостного сопротивления УПКТУ и соответствующей ему степени компенсации индуктивного сопротивления линии.

Библиографический список

1. **Выбор** закона регулирования устройства продольной компенсации с тиристорным управлением / А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Комухов [и др.] // ВЕСТНИК РНКСИГРЭ. – 2014. – Вып. 4. – С. 120 – 125.

2. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Н.А. Фоменко, студ.;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц.,
С.А. Словесный, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Проблема обеспечения электромагнитной безопасности биологических объектов является чрезвычайно актуальной в связи с ростом электромагнитного загрязнения биосферы. Воздействию электромагнитных полей (ЭМП) промышленной частоты подвергаются как персонал, обслуживающий действующие электроустановки, так и население, живущее или работающее вблизи линий электропередачи (ЛЭП) и подстанций.

Механизмы воздействия электрического и магнитного полей на организм человека еще не до конца изучены, но их отрицательное влияние на окружающую среду и живые организмы установлено и подтверждено соответствующими теориями. Кроме того, появляются все новые данные об отдаленных последствиях воздействия неионизирующих электромагнитных излучений на здоровье людей. Основными источниками ЭМП промышленной частоты, как известно, являются ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения.

Электромагнитная безопасность – совокупность организационных, инженерно-технических, лечебно-профилактических мероприятий, направленных на защиту живых организмов от отрицательного воздействия ЭМП. Организационные мероприятия включают в себя выбор режима работы, защиту временем и расстоянием, а к лечебно-профилактическим мероприятиям относят периодические медицинские осмотры. Инженерно-технические мероприятия направлены на уменьшение эмиссии элек-

ромагнитных излучений в окружающее пространство или на защиту локальной области от проникновения в нее сильных ЭМП. Эти мероприятия не всегда легко реализуемы и часто требуют значительных денежных затрат. В связи с этим возникает необходимость в новых инженерных подходах к решению указанной проблемы.

Существует множество численных методов расчета электрических полей, но в настоящее время удобнее и результативнее применять современные программные комплексы, позволяющие моделировать как электрические, так и магнитные поля промышленной частоты и контролировать уровни напряженности этих полей на различной удаленности от ЛЭП. Среди таких программных комплексов наиболее распространены Elcut, Femlab и ANSYS.

Целью исследовательской работы является моделирование электрических и магнитных полей промышленной частоты, создаваемых воздушными ЛЭП, для определения уровня их опасности в отношении живых организмов с последующей разработкой, при необходимости, защитных мероприятий, таких как экранирование. Моделирование электрических и магнитных полей промышленной частоты выполняется с применением программного комплекса ANSYS Maxwell.

Библиографический список

1. **Мисриханов М.Ш.** Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов / М.Ш. Мисриханов, Н.Б. Рубцова, А.Ю. Токарский – М.: Наука, 2010. – 870 с.
2. **Повышение** эффективности работы энергосистем: тр. ИГЭУ. Вып. 4 / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 432 с.

*А.А. Михайлюк, Н.С. Мольков,
А.Д. Неумоин, Ю.О. Чуркина, студ.;*
*рук. А.А. Мартыросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ¹

Для изучения вопросов анализа устойчивости электроэнергетической системы сформирована математическая модель, записанная в осях d-q,

¹ Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГЗ №2014/41; код проекта: 2915).

жестко связанных с роторами генераторов; вычислительные эксперименты проведены с помощью программного комплекса MatLAB.

Целью данных исследований является определение области устойчивости данной системы по методу D-разбиения, а также оценка возможности применения пакета MatLAB для моделирования электроэнергетических систем. В качестве объекта моделирования рассмотрена электроэнергетическая система, состоящая из двух электрических станций, соединенных с сетью высоковольтными линиями электропередачи.

В ходе исследований выявлено, что результаты расчета установившихся режимов в моделируемой системе совпадают с результатами, полученными ранее [1, 2]. Следовательно, математическая модель, сформированная в программном комплексе MatLAB, является достоверной и может быть использована для исследований устойчивости электроэнергетической системы.

Библиографический список

1. **Москвин, И.А.** Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации. // И.А. Москвин // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 5. – С. 46 – 50.

2. **Голов, В.П.** Области колебательной устойчивости изолированной системы из двух станций при вариации характеристики и мощности нагрузки / В.П. Голов [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 6. – С. 29 – 34.

*Alexander A. Novikov, Master Student;
Supervisor Alexander A. Bratolyubov, Ph.D., Associate Professor;
English Advisor Anna A. Egorova, Ph.D., Associate Professor;
(ISPEU, Ivanovo)*

ISSUE OF INDUCED VOLTAGE IN DE-ENERGIZED OVERHEAD LINES

Over a century the safety rules for maintenance operators dealing with de-energized overhead lines (OHL) under the induced voltage effect has been constantly improved. However, the point of safety at this type of work is still acute problem. The reality is that after release of the safety rules [2] more than 15 operators died because of the induced voltage effect [1].

It is the author's opinion that one of the reasons for such level of electrical accidents is the fact that the operative rules do not regulate the possible cases of abnormal modes in live OHL placed nearby, including short-circuits. The lifetime of the induced voltages in the de-energized OHL in abnormal modes is

determined by the duration of the fault current, which is within 0.1-5 seconds. Abnormal modes can take place rather frequently. For example, in Nizhnovergo 110 kV OHL 150-200 short-circuits were recorded during the year [3].

In this paper, we considered the case of induced voltage occurred at the 110 kV de-energized OHL as a result of single-phase short-circuit in the live 500 kV OHL. The calculation model for this case can be recreated using MatLab software system extensions «Simulink» (fig. 1).

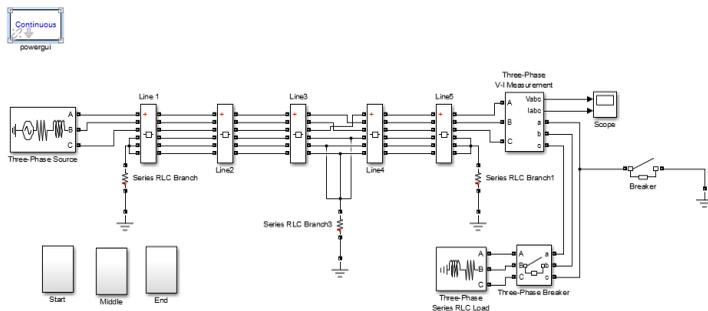


Fig. 1. Model of the OHL under the induced voltage effect in MatLab program

The short circuit in the live line affects the level of the induced voltage in the de-energized line (fig. 2). It is impressive to see that in the place of the phase transposition the level of induced voltage in the de-energized line increases sharply and exceeds the permissible rates [4].

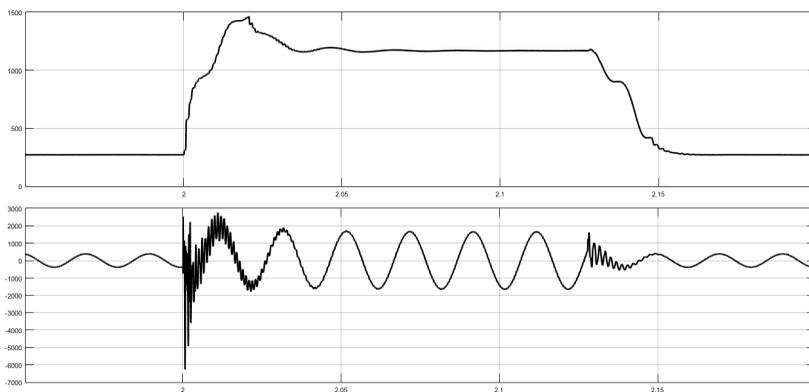


Fig. 2. Instantaneous and root-mean-square (rms) value of the induced voltage at the fault conditions in the active line

Admissible limit value of contact voltage in abnormal mode must not exceed 340 V with duration of 0.1 seconds [4]. The rms value in this case makes up approximately 1200 in 0.1 seconds, which is a circumstance that cannot be allowed.

These data confirm the necessity to consider the possible impact of the abnormal modes in live lines placed nearby in the preparation of the list of OHL which require additional safety measures to work under the induced voltage.

References

1. **Vanteev A. I.** Voprosy bezopasnoj organizacii rabot navozdushnyh liniyahelektroperedachi // Prilozhenie k zhurnalu «Energetik». – 2014. – № 4.
2. **Mezhotraslevye** pravila po ohrane truda (pravila bezopasnosti) pri ekspluatcii elektroustanovok. S izmeneniyami i dopolneniyami. POT RM-016—2001. RD 153-34.0-03.150-00. – М.: ЗАО «Izd-vo NC EN AS», 2003.
3. **Turaev V.A., Bazanov V.P.** O navedennyh napryazheniyah na vozdushnyh liniyah pri odnofaznyh korotkih замыkaniyah // Elektricheskie stancii. – 1998. – №3.
4. **GOST 12.1.038-82.** Predel'no dopustimye znacheniya napryazhenij prikosnoveniya i tokov, 2001.

Мучинду Вилсон, студ.;
рук. А.И. Кулешов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОБЗОР АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Современная энергетика в основном использует органическое топливо на тепловых электростанциях – 68,8 %, энергию деления ядра на атомных электростанциях – 10,6 % и гидроэнергию рек на гидроэлектростанциях – 20,7 %.

Запасы органического топлива (уголь, газ, нефть, сланцы и т.п.) ограничены, что требует более широкого использования так называемых возобновляемых источников энергии.

Возобновляемые источники энергии основаны на использовании постоянно существующих или периодически возникающих потоков энергии в природной среде и характеризуются естественным восполнением за короткий промежуток времени.

Энергия ветра, являясь производной энергии солнца, образуется за счет неравномерного нагревания поверхности Земли. Каждый час Земля получает 100 000 000 000 000 кВт·ч энергии солнца. Около 1 – 2 % солнечной энергии преобразуется в энергию ветра. Этот показатель в 50 – 100 раз превышает количество энергии, преобразованной в биомассу всеми растениями Земли. Ветроэлектроустановки (ВЭУ) преобразуют

кинетическую энергию ветра в электрическую с помощью генератора в процессе вращения ротора.

Энергия солнца является источником жизни на нашей планете. Солнце нагревает атмосферу и поверхность Земли. Благодаря солнечной энергии дуют ветры, осуществляется круговорот воды в природе, нагреваются моря и океаны, развиваются растения, животные имеют корм. Именно благодаря солнечному излучению на Земле существуют ископаемые виды топлива. Солнечная энергия может быть преобразована в теплоту или холод, движущую силу и электричество. Наиболее перспективными способами преобразования энергии солнца в электрическую являются :

- *фотовольтаика (PV)* – метод выработки электрической энергии путем использования фоточувствительных элементов для преобразования солнечной энергии в электричество;

- *гелиотермальная энергетика* – нагревание поверхности, поглощающей солнечные лучи, и последующее распределение и использование тепла, например, нагрев рабочего тела в двигателях Стирлинга.

Биотопливо – отходы сельскохозяйственного производства, пищевой и других видов промышленности, органическое вещество сточных вод и городских свалок – отходы, состоящие из биологического сырья – веществ биологического происхождения.

Геотермальная энергия – это энергия тепла, которое выделяется из внутренних зон Земли на протяжении сотен миллионов лет. По данным геолого- геофизических исследований, температура в ядре Земли достигает 3 000 – 6 000 °С, постепенно снижаясь в направлении от центра планеты к ее поверхности. Извержение тысяч вулканов, движение блоков земной коры, землетрясения свидетельствуют о действии мощной внутренней энергии Земли. Ученые считают, что тепловое поле нашей планеты обусловлено радиоактивным распадом в ее недрах, а также гравитационной сепарацией вещества ядра.

Альтернативная гидроэнергетика – использование механической энергии приливов, волн, течений и тепловой энергии океана.

Выводы

1. Несмотря на разнообразие технологий, альтернативной энергетики именно традиционные виды топлива будут играть ведущую роль еще долгое время. Альтернативные источники энергии, вероятно, будут являться дополнением к традиционной энергетике и занимать свою собственную нишу.

2. Несмотря на большое разнообразие способов получения энергии, наиболее перспективным видом альтернативной энергетики являются

малая гидроэнергетика, ветровая, солнечная, использование топлива, получаемого из биомасс и отходов.

Библиографический список

1. **Безруких П.П.** Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). – Москва, ИД «Энергия», 2010.
2. **Солнечная** энергетика / Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А. и др., Под ред. В.И. Виссарионова. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 276 с.
3. **Распоряжение** Правительства РФ от 4 октября 2012 года N 1839-р «Об утверждении комплекса мер стимулирования производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии».
4. **Сибикин Ю.Д.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. – М.: КноРус, 2010. – 232 с.

Е.А. Выборнова, студ.;
рук. А.И. Кулешов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Проблема регулирования напряжения весьма актуальна, и является одной из ключевых в современной электроэнергетике. В условиях возрастающих требований к повышению качества электроэнергии и снижению потерь в сетях необходимо развитие системы регулирования напряжения. Данное развитие должно основываться на широком применении современных средств регулирования напряжения и реактивной мощности, а также автоматических систем управления [1].

Появление в сети распределенных средств регулирования напряжения, принадлежащих разным субъектам, имеющих собственные цели регулирования, определяет необходимость качественно нового решения задачи регулирования напряжения в электрических сетях. Требуется разработка новых методов для управления режимов работы систем электроснабжения. Для регулирования напряжения в производственных условиях существует много способов и средств, часть из которых доступна и наиболее эффективна в энергосистемах, а часть наиболее приемлема для распределительных сетей потребителей [1].

Непрерывное в течение суток изменение режима работы энергосистемы и потребителей с дневными пиками нагрузки и с ночными провалами ее делает задачу удержания напряжения в заданных пределах практиче-

ски осуществимой только при наличии автоматически действующих средств регулирования напряжения [2].

Проблема регулирования напряжения касается как магистральных, так и распределительных сетей. Воздушные линии электропередачи (ВЛ) 6 – 10 кВ охватывают значительную часть территории России и имеют огромную протяженность. В связи с ростом энергопотребления перед распределительными сетевыми компаниями встает вопрос об увеличении их пропускной способности. Острой проблемой также становится увеличение длины существующих ВЛ для подключения новых потребителей, а также улучшение показателей качества электроэнергии [3].

В связи с этим сетевые компании проводят ряд мероприятий по модернизации существующих линий электропередач с применением нового оборудования, в частности одним из вариантов решения данных проблем является применение пунктов автоматического регулирования напряжения (ПАРН) на базе вольтодобавочных трансформаторов. На рис. 1. показана принципиальная электрическая схема ПАРН [3].

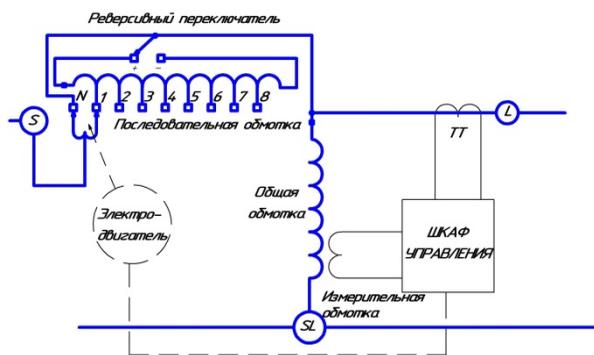


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема ПАРН

В процессе работы шкаф управления производит измерение напряжения со стороны нагрузки и сравнивает его с эталонным напряжением. Если фактическое напряжение отличается от требуемого, шкаф управления подает команду на электропривод, который перемещает переключатель на соответствующую ступень для повышения (или понижения) напряжения.

Это приводит к тому, что устройства типа ПАРН в расчетах режимов электрических сетей должны моделироваться нелинейными продольными ветвями.

Основной задачей является получение такой математической модели, которая в дальнейшем будет внедрена в программный комплекс

«ENERGY», на базе которого студенты электроэнергетического факультета нашего ВУЗа выполняют все практические расчеты.

Библиографический список

1. **Электроэнергия.** Передача и распределение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ruscable.ru/print.html?p=/article/Napravleniya_razvitiya_sistemy_regulirovaniya/, свободный.

2. **Михалков, А.В.** Что нужно знать о регулировании напряжения./ А.В. Михалков. – М.: Энергия, 1971. – 56 с.

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

А.Е. Морыганов, студ.;
рук. Н.А. Огорельшев, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В новых экономико-политических условиях одной из актуальнейших проблем является энергетическая безопасность России. Данная проблема многогранна и, наряду с экономическими, политическими и социальными аспектами, важным аспектом является техническое состояние объектов энергетики. Моральный и физический износ электротехнического оборудования, отсутствие достаточных финансовых средств для обновления и восстановления оборудования ведут к увеличению числа аварий в энергосистемах и снижению качества электроснабжения. Поэтому задача сохранения технического уровня и обеспечения надежности систем передач электроэнергии носит не только прикладной, но и стратегический характер в плане обеспечения энергетической безопасности России.

Одной из причин аварий в электрических сетях являются различного рода перенапряжения. Для сетей открытого типа основную опасность представляют грозовые перенапряжения, однако нельзя недооценивать и аварийность, связанную с внутренними перенапряжениями.

В данной исследовательской работе рассматриваются перенапряжения, связанные с феррорезонансными колебаниями в электрических сетях.

В зависимости от способа соединения различают феррорезонанс в последовательных (резонанс напряжений) и параллельных (резонанс токов) цепях. Переходные процессы в электрических сетях носят сложный характер, при плановых или аварийных отключениях создается множество

LC-цепочек, поэтому и резонансные явления могут иметь смешанный характер (рис. 1) [1].

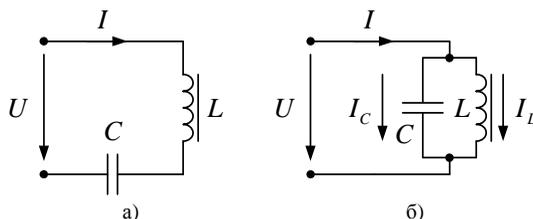


Рис. 1. Простейшие электрические цепи для исследования феррорезонанса напряжений (а) и токов (б): L – катушка с ферромагнитным сердечником; C – конденсатор

Для предотвращения подобных аварий необходима обязательная проверка и анализ режимов на возможность феррорезонанса, что предусмотрено нормами проектирования [2]. Предлагаемая методика носит приближенный и упрощенный характер, и не учитывает номенклатуру нового оборудования. Натурные испытания достаточно сложны и требуют значительных затрат времени и ресурсов. Наиболее оптимальным представляется использование методов математического моделирования феррорезонансных процессов. Существующие программные комплексы, например FeRes 1.0, разработанный более 10 лет назад в ИГЭУ, имеют жесткую структуру и не позволяют учитывать все особенности схемы, параметры оборудования и режимов.

Несмотря на кажущуюся простоту схем замещения, их моделирование является достаточно сложной задачей. Основная трудность связана с определением кривой намагничивания нелинейной индуктивности (в данном случае ТН). Она может быть получена как расчетным, так и экспериментальным путем. К сожалению, эта характеристика не является паспортной и производителями ТН не определяется [3].

Целью данной работы является математическое моделирование феррорезонансных явлений (а именно простейших электрических цепей). Приближенная модель для данного случая может быть воссоздана с помощью программного комплекса MatLab в пакете расширений Simulink.

Библиографический список

1. Бессонов, Л.А. Нелинейные электрические цепи. – М.: Высш. шк., 1977. – 343 с.
2. РД 34.20.517 Методические указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110 – 500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения.
3. Макаров, А.В. Об эффективности функционирования антиферрорезонансных трансформаторов напряжения. – Энергоэксперт. – 2013. – № 6.

Н.Е. Введенский, А.С. Казарин, студ.;
рук. И.А. Москвин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

УЛУЧШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ И УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Устройства продольной компенсации (УПК), устанавливаемые на линии электропередачи сверхвысокого напряжения (ЛЭП СВН) позволяют значительно повысить предел передаваемой мощности, а также положительно сказываются на показателях статической и динамической устойчивости [1]. Управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) позволяют еще более повысить предел передаваемой мощности, а также обеспечить приемлемый уровень напряжения по длине ЛЭП при передаче малой мощности при условии установки шунтирующих реакторов (ШР) на выводах УУПК.

Целью данной работы является исследование влияния комплексного управления устройствами УУПК и УШР на устойчивость и режимы работы рассматриваемой системы.

Исследование устойчивости производилось для изолированной системы из двух электрических станций, работающих на общую нагрузку (рис. 1). Генерирующие станции номинальной мощностью 2400 МВт каждая соединены между собой двухцепной линией электропередачи 500 кВ длиной 1000 км с установленным посередине УУПК. На каждом выводе УУПК установлены УШР.

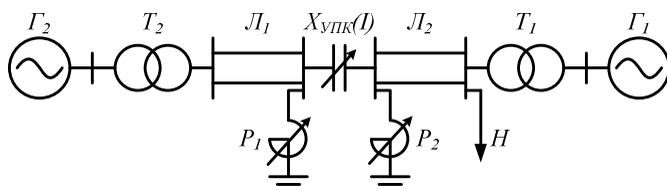


Рис. 1. Исследуемая электрическая схема

Для оценки влияния УШР на показатели режимов и устойчивость в математическую модель для расчета установившихся и переходных ре-

жимов исследуемой системы был введен следующий закон регулирования УШР [2]:

$$\Delta X_{УШР} = -K_{УШР} \cdot (U - U_0);$$

Данный закон позволяет обеспечить увеличение проводимости реактора при увеличении напряжения, тем самым снижая напряжение в точке подключения и наоборот.

Результаты, полученные в результате моделирования, свидетельствуют о том, что совместное регулирование УУПК и УШР позволяет повысить предел передаваемой мощности в сравнении с нерегулируемой передачей, а также улучшает характеристики нового установившегося режима при возникновении «большого» возмущения: взаимный угол между векторами ЭДС эквивалентных генераторов становится меньше, а новый установившийся режим наступает раньше.

Необходимо отметить, что эффект от совместного регулирования УУПК и УШР можно дополнительно увеличить, используя для этого устройства АРВ генераторов, однако это потребует дополнительного исследования.

Библиографический список

1. **Расчет** характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин // Вестн. ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 18 – 22.
2. **Саженов А.В.** Статические характеристики электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. – 2006. – № 3.

С.Д. Никитина, студ.;
рук. Д.Н. Кормилицын, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

УПРАВЛЯЕМАЯ ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ЛЭП СВН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРЕДЕЛА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МОЩНОСТИ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Электропередачи сверхвысокого напряжения обладают большой пропускной способностью и являются системообразующими связями. В энергосистемах всего мира все чаще применяются устройства продольной компенсации для увеличения пропускной способности данного типа линий. Максимального увеличения передаваемой мощности можно достигнуть применением продольной компенсации, распределенной по ли-

нии. Однако чаще всего устанавливают одно устройство продольной компенсации (УПК) посередине линии, что позволяет максимально повысить предел передаваемой мощности, поскольку предельная передаваемая мощность всей линии ограничивается пределом самого «слабого» участка [1].

При установке сосредоточенного УПК уровни напряжения на его выводах при передаче значительной мощности имеют большой перепад. С целью поддержания уровней напряжения на выводах УПК устанавливаются группы шунтирующих реакторов (ШР). Включение подобных устройств в работу перераспределяет потоки реактивной мощности по сети, что сказывается на режимах и устойчивости системы в целом.

Целью данной работы является исследование влияния количества реакторов на предел передаваемой мощности при применении управляемого устройства продольной компенсации (УУПК).

Исследуемая электрическая система представляет собой изолированную систему из двух эквивалентных генераторов, работающих через управляемую линию электропередачи на общую нагрузку. Линия электропередачи имеет УУПК в середине линии.

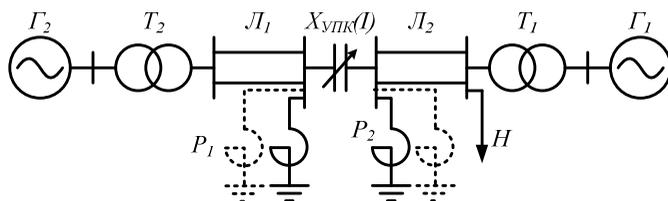


Рис. 1. Исследуемая электрическая схема

Расчет статических характеристик мощностей эквивалентных генераторов, произведенный ранее, показал значительное увеличение предела передаваемой мощности за счет применения регулируемой продольной компенсации [2].

Однако необходимо оценить, как сказывается мощность групп шунтирующих реакторов (ШР), устанавливаемых на выводах УУПК на режимы и предел передаваемой по компенсированной линии мощности.

На разработанной математической модели данной электроэнергетической системы произведен вычислительный эксперимент и получены угловые характеристики мощности генератора, а также угловые характеристики напряжения на выводах УУПК. Также для каждого случая произведена оценка запаса аперiodической статической устойчивости.

Выбор количества групп реакторов является многофакторной задачей, имеющей оптимизационный характер при двух ограничениях: напряжение на УПК должно быть не выше допустимых значений и пропускная способность линии должна быть максимально возможной. Решение этой задачи следует искать для каждого конкретного случая с учетом длины линии, места установки УПК, степени компенсации и других факторов [3].

Библиографический список

1. **Шакарян Ю.Г.**, Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач // *Электричество*. – 2013. – № 12.
2. **Расчет** характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин // *Вестн. ИГЭУ*. – 2012. – Вып. 6. – С. 18 – 22.
3. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учеб. для вузов. – М. Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

СЕКЦИЯ 13

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Председатель – к.т.н., профессор **Бушуева О.А.**
Секретарь – старший преподаватель **Полкошников Д.А.**

*М.Х. Назаров, магистрант; Ш.М. Султонов, асп.;
рук. Секретарев Ю.А, д.т.н., проф.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ АВТОНОМНОЙ МИКРОГЭС

В данной работе будет рассматривается система автоматического регулирования частоты автономной микроГЭС (МГЭС) с использованием симистора. Республика Таджикистан горно-рельефная страна более 93 % составляют горы. В этих горах протекают малые и средние реки. Горный рельеф местности позволяет создавать гидросооружения ГЭС с перепадом высот от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Предварительные исследования Таджикско-Норвежского Центра по развитию малой энергетики показывают, что в горных районах Таджикистана технически возможно и экономически целесообразно строительство более 900 МГЭС с мощностями гидроагрегатов от 100 до 3000 кВт [1]. Большая часть населения Таджикистана живут в горной местности. Для их электроснабжения в отдаленных регионах потребуются огромные капиталовложения для поставки электроэнергии от точки генерации мощности до потребителя. Поэтому в этих регионах выгодно будет строительство МГЭС.

При включении или отключении нагрузки к энергоагрегатам частота напряжения генератора будет изменяться. Так как все электрические аппараты потребителей электрической нагрузки рассчитаны и созданы на 50 Гц, изменения частоты не допускается. Изменение частоты приводит к выходу из строя электрооборудования потребителей. Следить за изменениями нагрузки и ручное регулирование скорости вращения турбины МГЭС для поддержания частоты практически невозможно. Известно, что для решения данной проблемы в МГЭС используют балластное сопротивление. В работе [2] приведена тиристорное управление балластной нагрузкой. В нашей работе предлагается система управления балластными сопротивлениями с использованием симистора. Симистор полупро-

водниковый прибор который широко используется в сетях переменного напряжения. Симистор представляет собой два встречно-параллельно включенных тиристора. Он пропускает ток в обоих направлениях [3]. Схема системы управления частоты МГЭС с использованием балластного сопротивления с использованием симистора приведена в рис. 1.

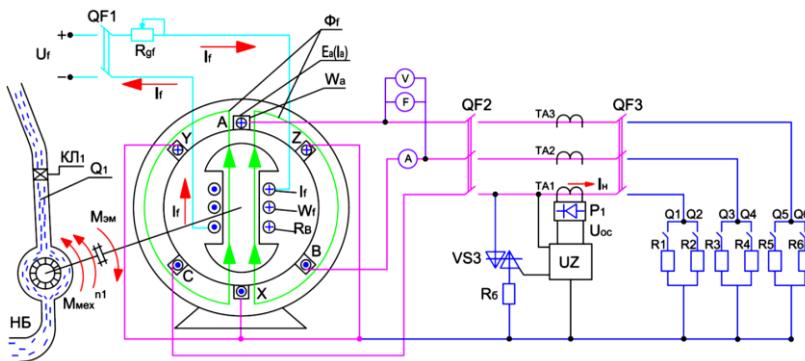
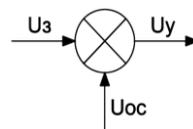


Рис. 1. Симисторная система автоматического регулирования частоты МГЭС

Рассмотрим принцип работы данной системы.

1. $Q_1 \div Q_6 = 0, I_H = 0,$
 $U_y = U_3 - U_{OC}, U_{OC} = 0, U_y = U_3, \alpha = 0^\circ$
2. $Q_1 = 1, Q_3 = 1, Q_5 = 1,$
 $U_{OC} = 0,5 \cdot U_3, I_H = 0,5 \cdot I_{HН},$
 $U_y = U_3 - U_{OC} = U_3 - 0,5 \cdot U_3, \alpha = 90^\circ$
3. $Q_1 = 1, Q_2 = 1, Q_3 = 1, Q_4 = 1, Q_5 = 1, Q_6 = 1,$
 $U_{OC} = U_3, I_H = I_{HН},$
 $U_y = U_3 - U_{OC} = U_3 - 0,5 \cdot U_3, \alpha = 180^\circ$



В заключении можно отметить, что использование данной системы регулирования частоты МГЭС будет отличаться от других систем регулирование своей простотой и экономичностью. Симисторную систему также можно применять для регулирования частоты автономно работающих МГЭС, и тем самым повысить их эффективность использования.

Библиографический список

1. **Таджикско**-Норвежский Центр по развитию малой энергетики [электронный ресурс]: URL: <http://www.tajhydro.tj/>.
2. **Лукутин Б.В., Обухов С.Г.** Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия ТПУ. – 2004. – Т. 307. – № 3. – С. 121 – 126.

3. Кадино Э. Цветомузыкальные установки – Jeux de Lumiere: Пер. с франц. – М.: ДМК Пресс, 2000. – 256 с.

А.А. Ачитаев, асп.;
рук. А.Г. Приступ, к.т.н., доц.,
А.В. Сапселев, д.т.н., проф.,
С.Н. Удалов, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ТРАНСМИССИИ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ЦЕЛЯХ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Параллельная работа генераторов электрических станций, входящих в энергосистему, отличается от работы генераторов на одной станции наличием линий электропередачи, связывающих эти станции. Сопротивления линий электропередачи уменьшают синхронизирующую мощность генераторов и затрудняют их параллельную работу. Кроме того, отклонения от нормального режима работы системы, которые происходят при отключениях, коротких замыканиях, внезапном сбросе или увеличении нагрузки, также могут привести к нарушению устойчивости, что является одной из наиболее тяжелых аварий, приводящей к перерыву электроснабжения потребителей. Поэтому изучение проблемы устойчивости очень актуально.

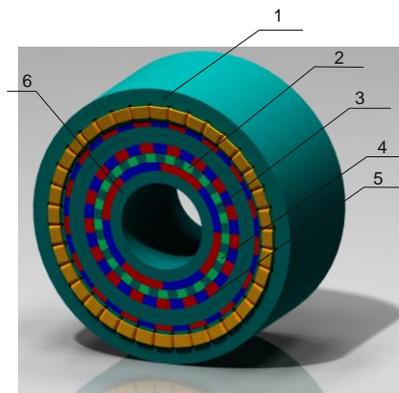


Рис. 1. Эскиз магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением: 1 – обмотка управления; 2 – немагнитная вставка; 3 – модулирующее кольцо из ферромагнитных сегментов; 4 – тихоходное звено; 5 – ротор управления с постоянными магнитами; 6 – быстроходное звено

В данной работе в целях стабилизации скорости вращения вала генератора при различных возмущениях со стороны энергосистемы предлагается решение, которое состоит в использовании технологии псевдопрямого привода на основе магнитной трансмиссии и звена изменения скорости вращения выходного вала [1]. Магнитная трансмиссия осуществляет преобразования момента и скорости между двумя вращающимися частями с различным числом постоянных магнитов через модулирующие ферромагнитные сегменты на тихоходном валу. Они позволяют преобразовать скорость вращения тихоходного вала, которая зависит от заданного числа пар полюсов ферромагнитных сегментов [2].

Уравнение, определяющее движение тихоходного и быстроходного звеньев представляются в следующем виде [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_h \frac{d\omega_h}{dt} = T_e - \overbrace{\frac{T_{\max}}{G_r} \sin(\theta_e)}^{\text{Реактивный момент}} - \overbrace{B_h \omega_h - K_d (p_h \omega_h - n_s \omega_0)}^{\text{Затухание}} \\ J \frac{d\omega_0}{dt} = \overbrace{T_{\max} \sin(\theta_e)}^{\text{Передаточный момент от ротора высокой скорости к ротору низкой скорости}} - \overbrace{B_0 \omega_0 + K_d G_r (p_h \omega_h - n_s \omega_0) - T_L}^{\text{Затухание}} \end{array} \right.$$

где J_h , B_h – момент инерции и коэффициент затухания ротора высокой скорости соответственно; ω_0 , J , B_0 – угловая скорость, приведенный момент инерции вала тихоходного ротора J_0 и нагрузки J_L и комбинированные коэффициент затухания тихоходного ротора и нагрузки соответственно.

Библиографический список

1. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Slip recovery and prevention in Pseudo Direct Drive permanent magnet machines // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – IEEE. – 2013. – С. 2162 – 2169.
2. Приступ А.Г., Ачитаев А.А., Удалов С.Н. Исследование магнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением в ветроэнергетической установке в целях повышения запаса динамической устойчивости // Изв. томского политехн. ун-та. – 2015. – т. 326. – № 10.

Ш.Дж. Джураев, асп.;
рук. В.Н. Тульский, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Вопросы обеспечения качества электрической энергии по прежнему систематически возникают в электроэнергетических системах всех стран.

Это связано с увеличением доли электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой и их чувствительностью к кондуктивным помехам. Ущерб, которые возникают в энергосистемах из-за низкого качества электроэнергии оцениваются сотнями миллионов рублей.

Энергосистема Республики Таджикистан постепенно развивается, по этому в её составе появляются потребители, которые влияют на электромагнитную обстановку и качество электроэнергии (КЭ) энергосистемы в целом. В энергосистеме Таджикистана электроэнергия в основном вырабатывается гидроэлектростанциями (табл. 1).

Таблица 1. Суммарная установленная мощность электростанций

Типы электростанций	Установленная мощность	
	Р _{уст} , МВт	Р _% , %
ГЭС	4928,5	91,98
ТЭЦ	418	7,8
Альтернативная энергетика	11,8	0,22
Итого	5358,3	100

Среди потребителей энергосистемы Государственное унитарное предприятие «Таджикская алюминиевая компания» (ГУП «ТАЛКО») особенное место. ГУП «ТАЛКО» оказывает существенное влияние на режим работы энергосистемы Таджикистана, так как мощность, потребляемая заводом, достигает 40 % от вырабатываемой всеми электростанциями республики. С учетом, что 95 % получаемой ГУП «ТАЛКО» электроэнергии идет на работу преобразовательных установок электролизных ванн, данное предприятие является доминирующим источником искажения синусоидальности кривой напряжения в электрических сетях республики на всех классах напряжения.

Для оценки качества электроэнергии и фактического уровня помех, создаваемых предприятием, а так же разработки организационных, технических и методических мероприятий по обеспечению КЭ в период с 01 по 16 июля 2015 года был произведен инструментальный контроль КЭ на разных классах напряжение (10; 220 и 500 кВ) в энергосистеме республики. В качестве средства измерения использовались приборы типа Ресурс-UF2М. Длительность наблюдения в каждой точке не менее суток. Результаты измерения показали, что КЭ не соответствуют нормативным требованиям [1] по следующим показателям:

- верхняя и нижняя граница отклонения частоты Δf достигает +0,83 Гц и -0,43 Гц соответственно, что связано с некорректной работой средств автоматического регулирования частоты в энергосистеме и устаревшей системы автоматики на электростанциях;

- зарегистрированы нарушения по $K_{U(n)}$ для следующих гармоник: $K_{U(11)}$ – до 3,15 %, $K_{U(13)}$ – до 2,3 %, $K_{U(23)}$ – до 1,7 % и $K_{U(25)}$ – до 1,1 %. Спектр гармоник, характерен для работы 12-пульсного преобразователя.

А так же по результатам измерения почти во всех точках контроля было зафиксирована колебание напряжения и провалы напряжения. Причиной возникновения фликера Pst и Plt является работа резкопеременных нагрузок (преобразователи, мощных сварочных аппаратов и т.п.), а провалы напряжения частые коммутации в электрических сетях из-за ограничений потребления электроэнергии.

Проведенные инструментальные исследования позволяют верифицировать математическую модель энергосистему, к которому подключен ГУП «ТАЛКО» и выбрать оптимальный способ подавления помех, создаваемых предприятием.

Библиографический список

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

К.С. Андреева, С.А. Заболотько, студ.;
рук. В.М. Мякишев, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

На процессы, которые протекают при повторном возбуждении сварочной дуги, как известно, влияет поведение системы «источник питания – сварочная дуга», другими словами, динамические свойства. Пониженная устойчивость горения сварочной дуги является основным недостатком, препятствующим широкому применению источников переменного тока.

Наиболее удобный метод оценки динамических свойств источника заключается в индикаторном методе исследования сварочной цепи. При переходе тока через ноль к выходным зажимам источника подается линейно-нарастающий импульс тока, а напряжение, возникающее при этом, осциллографируется и расшифровывается. Динамические свойства источника питания характеризуются параметрами восстанавливающегося напряжения, а именно: скоростями восстановления напряжения и величиной возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряже-

ния [1], т.е. тем наибольшим значением напряжения, устанавливающимся между электродами при обрыве дуги.

Долгое время применялось понятие «скорости восстановления напряжения» для характеристики восстанавливающегося напряжения. Различаются средняя и максимальная скорости.

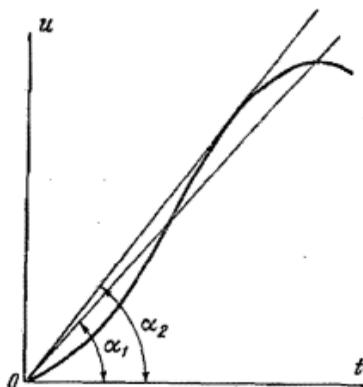


Рис. 1. К определению средней и максимальной скорости восстановления напряжения

Из рис. 1 видно, $v_{ucp} = tg\alpha_1 = 4fU_m$, — средняя скорость, где f — частота ВН, U_m — амплитуда возвращающегося напряжения промышленной частоты, то есть такого напряжения, которое появляется на контактах выключателя после гашения дуги.

Максимальная скорость определяется $v_{u\max} = tg\alpha_2$. Часто принимают $v_{u\max} \approx 1,5 v_{ucp}$.

В процессе повторного возбуждения сварочной дуги восстанавливающаяся прочность дугового промежутка растет с какого-то первоначального значения по экспоненциальному закону. Тогда при определенном значении возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряжения источник должен обладать скоростью восстановления напряжения, большей какого-то критического значения ($\tau_u < \tau_{кр}$). В противном случае при любом значении возвращающейся составляющей восстанавливающегося напряжения дуга не загорится. Нижний предел возвращающейся составляющей определяет напряжение зажигания дуги. Если окажется, что оно меньше напряжения зажигания, то при любой скорости восстановления напряжения дуга не загорится. Здесь возможно несколько случаев несогласования процесса восстановления электрической прочности дугового промежутка, скорости и величины восстанавливающегося напряжения [3].

Если после перехода тока через ноль дуга восстанавливается, то восстанавливающееся напряжение в некоторый момент времени пробивает дуговой промежуток, а через него начинает проходить ток [2].

Линейно-нарастающая волна тока, которая создается цепочкой L - C индикатора, вводится в исследуемую цепь. В качестве коммутирующего элемента в данном случае служит управляемый тиристор [1]. Индикатор на тиратроне спроектирован и изготовлен в Самарском государственном техническом университете, учитывая специфики восстановления напряжения в сварочных цепях, т. е. больших скоростей восстановления напряжения. Он предусматривает многократную синхронизированную подачу импульсов тока, благодаря этому достигается надежная запись кривой восстановления напряжения [3]. Практический интерес представляют входные параметры источника питания.

Масштаб записи восстанавливающегося напряжения при неизменном напряжении зарядной емкости C зависит от величины формирующей индуктивности L , причем необходимо, чтобы $L \approx 10 \cdot L_{\text{нагр}}$. Оптимальная индуктивность L , учитывая, что ток синусоидален, находится из соотношения напряжений U_c/U_0 :

$$\frac{U_c}{U_0} = \frac{\frac{di}{dt}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_u} = \frac{\omega I_m}{U},$$

откуда

$$L = \frac{U_c U}{U_0 I_m \omega} = Z_{\text{кз}} \frac{U}{\sqrt{2} U_0 \omega},$$

где U_0 – напряжение, необходимое для отклонения луча осциллографа на полный экран; U_c – номинальное напряжение холостого хода трансформатора; U – зарядное напряжение конденсатора; i_u – испытательный ток; i – ток короткого замыкания.

Для сварочных трансформаторов типа СТШ формирующая индуктивность L меняется в зависимости от положения магнитного шунта и находится в пределах $0,004 \div 0,6$ (Гн) [3].

Подбирая для каждого конкретного случая формирующую индуктивность, добиваются линейного закона изменения выходного тока, что соответствует теореме Тевенена, и производят прямую запись восстанавливающегося напряжения на объекте, что позволяет избежать дополнительных погрешностей [3].

Библиографический список

1. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М., Машиностроение, 1970.

2. **Залесский А.М.** Электрическая дуга отключения. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1963.

3. **Мякишев В.М.** Сварочный трансформатор с насыщающимся участком магнитопровода. – Самара.: гос. тех. ун-т, 2010.

В.Н. Калечиц, асп.;
рук. В.Б. Козловская, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Установки наружного освещения и устройства управления ими в соответствии с требованиями к обеспечению надёжности электроснабжения относят к следующим категориям: первая (диспетчерские пункты управления сетями наружного освещения); вторая (осветительные установки улиц, дорог, площадей, тоннелей и др., относящихся к категории А); третья (остальные осветительные установки) [1].

Обеспечение второй категории надёжности может осуществляться путём двустороннего питания линии наружного освещения. Такие схемы применяются для магистральных улиц, кольцевых дорог и формируются с учётом обеспечения устойчивой работы всех осветительных установок, подключенных к данной линии наружного освещения.

В качестве примера рассмотрена осветительная линия с двусторонним питанием. К двум разным ТП 10/0,4 кВ подключены пункты питания, которые расположены непосредственно в ТП. В осветительной линии задействованы лампы типа ДНаТ мощностью 150 Вт, подключённые через ЭмПРА с импульсным зажигающим устройством и компенсирующим конденсатором ($\cos\varphi_n = 0,86$) в светильнике типа ЖКУ. Удалённость от первого пункта питания до ближайшей опоры равна 80 м; от второго пункта питания до ближайшей опоры – 50 м. Расстояние между опорами – 30 м, число опор – 30, число светильников на опоре – 1. Для питания светильников используется кабель с алюминиевыми жилами, проложенный в земле. Распределение светильников между фазами – А-В-С-А-В-С, подключены симметрично. В расчётах принимаем, что активная мощность с учётом потерь в ЭмПРА и полный ток с учётом компенсации реактивной мощности зависят от напряжения и изменяются пропорционально зависимостям, представленным в [2].

Расчёты различных режимов сети наружного освещения осуществлены методом последовательных приближений [3]. Программа по расчёту

реализована в среде Mathcad и учитывает максимально возможную исходную информацию для выбора сечения жил проводника и получения точных показателей режима работы. Последовательно произведены расчёты режима работы сети с одинаковыми уровнями напряжения в обоих пунктах питания (равными 230 В) при использовании кабелей со следующими сечениями алюминиевых жил, мм²: $S = 2,5; 4; 6; 10$.

Рассчитанные значения напряжений фазы *A* в точках рассматриваемой сети для первого режима работы отражены на рис. 1. На оси абсцисс представлены точки рассматриваемой сети, первому пункту питания соответствует координата 1; второму пункту питания – 32.

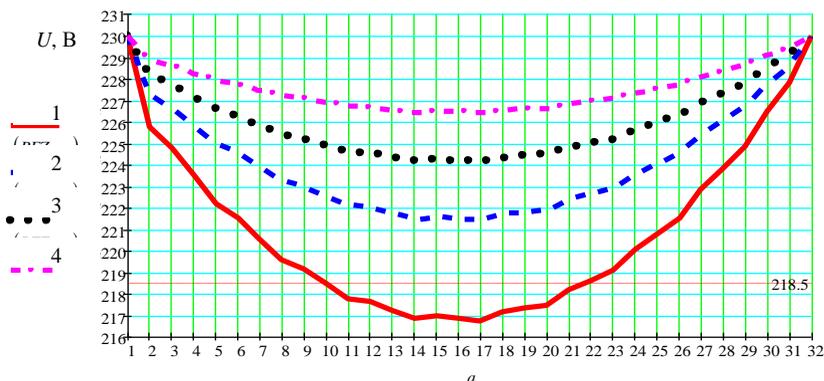


Рис. 1. Графики распределения модуля напряжения в точках осветительной линии для фазы *A*, построенные для различных сечений алюминиевых жил, где U – напряжение, В; a – точка сети; 1 – распределение напряжения при сечении жилы кабеля $S = 2,5$ мм²; 2 – при $S = 4$ мм²; 3 – при $S = 6$ мм²; 4 – при $S = 10$ мм²

Исходя из условий выбора сечения осветительной линии наружного освещения, расчётное отклонение напряжения в точках схемы не должно превышать 5 % от номинального напряжения сети (для рассматриваемого примера не менее $230 \cdot 0,95 = 218,5$ В). Ближайшее сечение алюминиевой жилы, соответствующее данному условию, на основании расчётов и представленного рисунка 1 равно 4 мм².

Также при выборе сечения необходимо, чтобы отклонение напряжения на ближайшем светильнике не превышало 2,5 % от номинального напряжения сети (в рассматриваемом примере не менее $230 \cdot 0,975 = 224,2$ В). Ближайший к первому пункту питания светильник подключен к фазе *A*, расчётное напряжение на нём составляет 227,2 В; ближайший к второму пункту питания светильник подключен к фазе *C*, расчётное напряжение на нём составляет 228,1 В (значения взяты для сечения 4 мм²). Таким образом, данное условие выполняется.

Библиографический список

1. ТКП 45-4.04-287-2013. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования. – Минск: Министерство архитектуры и строительства, 2013. – 19 с.
2. **Справочная** книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972с.
3. **Герасименко А.А.** Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.

В.В. Воробей, асп.;
рук. В.Н. Радкевич, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)

**К ОБОСНОВАНИЮ ПРИМЕНЕНИЯ
СОБСТВЕННЫХ ГЕНЕРИРУЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Республика Беларусь вследствие малой обеспеченности собственными топливно-энергетическими ресурсами и наличия перекрестного субсидирования, применяемого при государственном регулировании цен на электроэнергию для населения, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых потребителей, продолжает сохранять высокие тарифы на электроэнергию для промышленных предприятий. По состоянию на 01.12.2015 г. тариф для населения установлен правительством на уровне 5 центов США ($\$$) за 1 кВт·ч, что почти в два раза ниже средней себестоимости производства электроэнергии в белорусской энергосистеме, которая по данным государственного производственного объединения электроэнергетики Беларуси (ГПО «Белэнерго») составляет 9 – 9,5 $\$/кВт·ч$. В то же время тариф на электроэнергию для крупных промышленных предприятий с учетом индексации составляет 11,6 $\$/кВт·ч$ или 11 евро-центом (ϵ) за 1 кВт·ч. Для сравнения отметим, что это выше, чем в Польше (8,3 $\epsilon/кВт·ч$), Дании (8,8 $\epsilon/кВт·ч$), Австрии (10,6 $\epsilon/кВт·ч$) и других государствах Евросоюза [1].

Таким образом, тарифы на электроэнергию для промышленных потребителей в Республике Беларусь сопоставимы со среднеевропейскими, что при большей энергоемкости промышленности обрекает национальных производителей на снижение конкурентоспособности вследствие сравнительного роста энергетических затрат [2].

В этих условиях промышленные предприятия вынуждены частично, а в некоторых случаях и полностью отказываться от получения электро-

энергии из энергосистемы и искать альтернативные пути энергообеспечения. Крупные предприятия с высоким электро- и теплотреблением для сокращения затрат на энергоснабжение и электроэнергетической составляющей себестоимости продукции пошли по пути сооружения собственных генерирующих источников. Согласно пресс-релизу Министерства энергетики Республики Беларусь от 22.12.2014 г. параллельно с генерирующими источниками энергосистемы работало 183 блок-станции организаций, не входящих в состав ГПО «Белэнерго», общей мощностью 636 МВт.

За последние 5 лет установленная мощность блок-станций в стране возросла в 1,6 раза и достигла 6,7 % от установленной мощности белорусской энергосистемы (9446 МВт на конец 2014 года). Отмеченный факт подчеркивает экономическую заинтересованность предприятий в наличии собственных генерирующих источников.

В то же время проведенные исследования показывают, что многие специалисты в области энергетики считают строительство хозяйствующими субъектами локальных энергоисточников на базе газопоршневых и газотурбинных установок, преобладающих в настоящее время в малой энергетике, стратегической ошибкой, которая может привести к серьезным проблемам в энергосистеме [3, 4].

Наличие столь противоречивых точек зрения подтверждает недостаточную степень проработки вопросов применения промышленными потребителями электроэнергии собственных генерирующих источников в условиях функционирования экономики Республики Беларусь. В связи с этим необходимо разработать теоретические основы рационального применения собственных генерирующих источников потребителей электроэнергии, изучить влияние промышленных электростанций на режимы работы электрических сетей и электропотребления, дать оценку целесообразности применения автономных систем электроснабжения промышленных предприятий и т.д.

Библиографический список

1. **Energy**, transport and environment indicators – 2015 edition / Eurostat Statistical books. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. – 222 pages.
2. **Заборовский А.М.** Ценообразование на электрическую энергию в условиях либерализации // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2010. – № 6. – С. 13 – 20.
3. **Спагар И.Н.** К выбору когенерационной технологии в малой энергетике // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 11. – С. 31 – 33 .
4. **Ковалев Л.И.** Эффективность локальных энергоисточников в народном хозяйстве и экономике промышленных предприятий // Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 11. – С. 14 – 18.

*И.В. Дворянчиков, асп., К.С. Аверьянова, студ.;
рук. В.П. Степанов, д.т.н., проф.
(СамГТУ, г. Самара)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ РАЙОНОВ

В связи с развитием и обустройством месторождений нефтегазодобычи большой рост и развитие получили сети электроснабжения нефтяных промыслов. В развитых районах нефтегазодобычи, в т.ч. Самарской области, где имеется разветвлённая сеть электроснабжения, бурение нефтяных и газовых скважин осуществлялось от буровых установок с электроприводом. Влияние электропривода буровых установок на качество электроэнергии рассмотрено в статье [1]. Еще более актуальными вопросы качества электроэнергии стали в процессе разработки месторождений, интенсификации добычи нефти после завершения основного процесса бурения. В связи с интенсификацией добычи нефти широкое применение в последнее время нашли погружные электрические центробежные насосы с погружными электродвигателями высокой мощности.

Задачами современных приводных систем является обеспечение процесса регулирования скорости вращения в широком диапазоне, а также возможность осуществления «мягкого пуска» погружных электродвигателей (ПЭД). На сегодняшний день самым современным решением данных задач является использование в качестве источника питания преобразователя частоты [2]. Главные проблемы, которые могут возникнуть при использовании преобразователей частоты – это их негативное влияние на питающую сеть. Неуправляемый выпрямитель двухзвенного преобразователя частоты потребляет нелинейный ток, загрязняющий сеть электроснабжения высшими гармониками (5, 7, 11 и т. д.) [3 – 5].

Цель работы – исследование состава и уровня высших гармоник напряжения в нефтепромысловых сетях электроснабжения, создаваемых станциями управления погружными электродвигателями и сравнения их с требованиями ГОСТ 32144-2013 [5].

Зачастую на станциях управления ПЭД используются преобразователи частоты без фильтров высших гармоник в сторону сети.

Экспериментальные исследования высших гармоник напряжения проводились на месторождениях нефти Самарской области. Анализ полученных результатов измерений позволил сделать следующий вывод: Станции управления «Centrilift 4500» при питании мощных ПЭД типа

MOTOR 450 сер. и DOMINATOR 456 сер. вносят недопустимые (не удовлетворяющие нормам ГОСТ 32144-2013 [6]) искажения синусоидальной формы питающего напряжения в части превышения значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения и значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

Анализ результатов измерения $KU(n)$ свидетельствует о том, что наибольшее искажение синусоидальной формы кривой напряжения вносит 5 гармоника.

Несоблюдение условий электромагнитной совместимости систем электроснабжения и электрооборудования нефтедобывающего комплекса по уровню высших гармоник напряжения может иметь ряд негативных технических и экономических последствий.

Вывод: зафиксированы недопустимые нарушения показателей качества электроэнергии по составу и уровню высших гармоник напряжения в системах электроснабжения ПЭД с частотным управлением от станций «Centrilift 4500».

Библиографический список

1. Степанов В.П., Кротков Е.А., Гудков А.В., Малахов В.С. Результаты исследования высших гармоник напряжения в системах электроснабжения буровых установок типа БУ-2500 // Промышленная энергетика. – 2010. – № 3 – С. 45 – 48.

2. Меньшов Б.Г. Электротехнические установки в нефтегазовой промышленности. – М.: Изд-во «Недра», 2000. – 270 с.

3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.

4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2005.

5. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 320 с.

6. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Т.Е. Тюндина, асп.;
рук. Д.Е. Дулепов, к.т.н.
(НГИЭУ, г. Княгинино)

РАБОТА СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ДЕМПФИРУЮЩИМ РЕЗИСТОРОМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,38 кВ

Одной из причин низкой эффективности использования электрической в распределительных сетях 0,38 кВ является несимметрия токов,

обусловленная неравномерно распределенной, носящей случайный характер однофазной нагрузкой. Наиболее эффективным способом снижения уровня несимметрии в распределительных сетях 0,38 кВ является применение установок компенсации реактивной мощности в качестве симметрирующего устройства.

Установка (рис. 1, а) представляет собой шунто-симметрирующее устройство (ШСУ), состоящее из трех конденсаторных батарей, соединенных по схеме «звезда» с нейтральным проводом. В каждой фазе которой кроме батареи конденсаторов установлена индуктивность, назначение которой – ограничение сверхтоков, протекающих через конденсатор. Индуктивность в каждой фазе ШСУ позволяет настроить контур LC на фильтрацию токов нулевой последовательности с некоторой расстройкой вниз от резонансной частоты. Подобная расстройка на 10 – 15 % необходима для исключения резонансных явлений в контуре. Из условия $X_C/3 = 3X_L$ получается, что $X_C/9 = 9X_L$, т.е. реактивное сопротивление конденсатора практически в 9 раз больше реактивного сопротивления реактора. Это значит, что электрическая энергия, запасаемая в конденсаторе примерно в 9 раз больше магнитной энергии, запасаемой в реакторе.

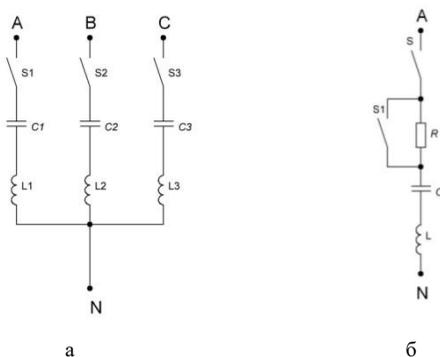


Рис. 1. а – схема симметрирующего устройства; б – схема одной фазы симметрирующего устройства

Наличие двух накопителей энергии обуславливает переходный процесс. Перегрузки по току и напряжению на конденсаторах устанавливаются Правилами устройства электроустановок [1].

Коммутационные перенапряжения при включении ШСУ можно снизить, если при подключении установки к сети последовательно с конденсатором и реактором включать демпфирующий резистор R , который после окончания переходного процесса шунтируется (рис. 1, б) [2].

Чем больше сопротивление демпфирующего резистора, тем меньше коммутационные перенапряжения. При значении сопротивления демпфирующего резистора R , равного значению волнового сопротивления контура, коэффициент перенапряжений K_u практически становится равным единице. При большем значении R K_u становится меньше единицы (рис. 2).

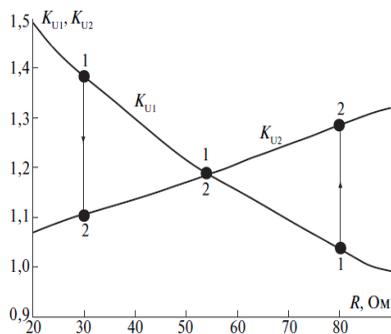


Рис. 2. Перенапряжения в ШСУ: 1 – при включении КУ с демпфирующим резистором; 2 – при шунтировании демпфирующего резистора

В действительности значение оптимального сопротивления демпфирующего резистора следует выбирать несколько меньшим, так как первое перенапряжение длится значительно меньше, чем второе. Что касается бросков тока, то они не превышают нормированных длительных перегрузок в 1,3 от номинальных значений и не являются опасными в связи с кратковременностью их действия (менее 0,04...0,06 с). Неопасными можно считать и перенапряжения с $K_u = 1,18$ по следующим причинам: из-за дополнительного нагрева конденсаторов от высших гармонических тока уменьшают нагрузку конденсаторов по первой гармонике. Другими словами, путем увеличения числа последовательно включенных конденсаторов уже на стадии проектирования уменьшают напряжение на конденсаторах примерно на 10...14 % от номинального значения. Таким образом, в переходном режиме при включении ШСУ на втором этапе напряжения на конденсаторах при шунтировании демпфирующего резистора даже не в нуль тока не будут превосходить допустимых значений и, учитывая его кратковременность, переходный процесс не будет опасным.

Библиографический список

1. Правила устройств электроустановок ПУЭ. 7-е изд. – М.: Кнорус, 2009. – 488 с.
2. Серебряков А.С. Пути снижения коммутационных перенапряжений при включении-отключении установок компенсации реактивной мощности / А.С. Серебряков, Д.Е. Дулепов, Д.А. Семенов // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2015. – № 7. – С. 17 – 19.

3. **Серебряков А.С.**, Герман Л.А., Дулепов Д.Е. Анализ переходных процессов в дискретно регулируемых установках для компенсации реактивной мощности // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. Серия «Технические науки». – 2010. – Вып. 1. – С. 28 – 34.

А.Р. Ахметшин, к.т.н., ст. преп.;
рук. А.И. Федотов, д.т.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ СИММЕТРИРУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

На сегодняшний день актуальной задачей является обеспечение потребителей распределительных электрических сетей (РЭС) напряжением 0,4 – 10 кВ качественной электроэнергией (КЭ), соответствующей ГОСТ 32144-2013 [1].

Под воздействием неравномерного распределения нагрузок в трёхфазной электрической сети имеет место несимметрия напряжений. В результате возникают дополнительные потери мощности, значительно снижается срок службы электрических машин. Для устранения несимметрии фазных напряжений выпускаются трансформаторы с симметрирующей обмоткой (СО) типа ТМГСУ и симметрирующие автотрансформаторы типа АТС-С.

Автотрансформаторы типа АТС-С эффективно устанавливать непосредственно у потребителя. На рис. 1 представлена схема автотрансформатора с компенсационной обмоткой (КО).

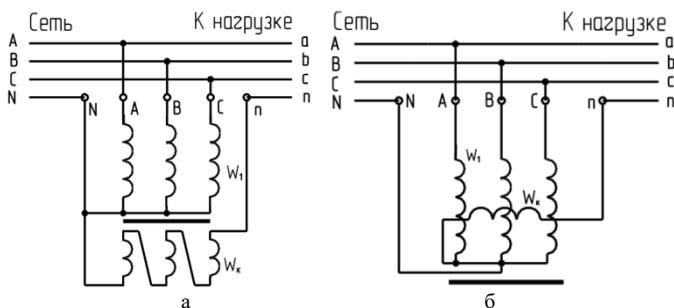


Рис. 1. Автотрансформатор с КО, выполненной на каждой фазе (а), поверх обмоток всех трех фаз автотрансформатора (б)

К достоинствам АТС-С следует отнести то, что они обладают способностью фильтрации токов высших гармоник, кратных трем [2].

Симметрирование напряжения в трансформаторах типа ТМГСУ происходит за счет использования специальной СО, позволяющей при несимметричной нагрузке уменьшить перекос фазных напряжений [2].

Для трансформаторов типа ТМГСУ авторами была разработана методика определения параметров схемы замещения трансформаторов с СО (ТСО) с разными схемами соединения обмоток, так как стандартных параметров трансформаторов, полученных из опытов холостого хода и короткого замыкания, недостаточно для расчета параметров схемы замещения ТСО. Поэтому в работе было предложено дополнительно использовать внешние характеристики, снятые для неполнофазных режимов работы ТСО [3].

Схема замещения ТСО представлена на рис. 2.

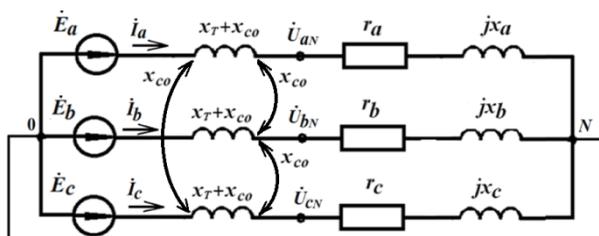


Рис. 2. Схема замещения ТСО, приведенная к его вторичной стороне

Для трансформаторов со схемой соединения «звезда – звезда с нулем» часть магнитного потока замыкается в несимметричных режимах через бак. Поскольку этот поток обусловлен той частью фазных токов, которая идентифицируется как токи нулевой последовательности, то логично использовать математическое описание несимметричных режимов работы трансформаторов через симметричные последовательности токов и напряжений, вводя соответствующие параметры в схему замещения.

По итогам исследования был сделан вывод, что результаты расчетов с использованием симметричных составляющих значительно близки по загруженной фазе к аппроксимированным значениям, построенным по данным завода изготовителя, и в дальнейшем для оценки технической и экономической эффективности применения ТСО предлагается использовать метод симметричных составляющих.

Статья подготовлена в процессе выполнения НИР «Методы повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии в распределительных электрических сетях», задание № 2014/448 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России.

Библиографический список

1. **ГОСТ 32144-2013** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. **Сайт** компании ОАО «Минский электротехнический завод им. В.И. Козлова». URL: <http://www.metz.by> (дата обращения: 20.12.15).
3. **Федотов А.И.** Определение параметров симметрирующих трансформаторов / А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин, Н.В. Чернова // Промышленная энергетика. – 2015. – № 1.

А.С. Петрусёв, студ.;
рук. Б.В. Лукутин, д.т.н., проф.
(ТПУ, г. Томск)

**ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНЫХ УСТАНОВОК**

На данный момент на 70 % территории России отсутствует централизованное электроснабжение. В данных районах проживает порядка 20 млн. человек, которые пользуются в основном дизельными генераторами. Стоимость вырабатываемой дизельными установками электроэнергии может быть крайне высокой и достигать свыше 50 руб. за кВт·ч, что связано в основном с трудоёмкостью доставки топлива в некоторые районы. Это говорит о необходимости использования в таких областях альтернативных источников энергии, в частности солнечной.

Единственным способом значительно снизить себестоимость энергии, вырабатываемой солнечными элементами, является установка концентратора. Концентратор представляет собой устройство, осуществляющее сбор солнечного потока с большей площади и направляя его на солнечные элементы с меньшей площадью.

Но основные типы концентраторов имеют ряд весомых недостатков, которые ограничивают их массовое распространение. Для параболических концентраторов это, в первую очередь, крайняя массивность и громоздкость, а также проблемы с эксплуатацией – из-за чашеобразной формы концентратора в нём скапливаются атмосферные осадки, а конденсат внутри резко снижает эффективность работы.

Для решения первой проблемы предложено использовать акриловый концентратор, который описан в [1]. Он представляет собой оптическую систему, выполненную преимущественно из акрила.

Концентратор выполнен таким образом, что лучи, падающие на его поверхность, в результате серий преломления и полного внутреннего

отражения перенаправляются в торцы, на которых расположены небольшие фотоэлементы.

Данный концентратор имеет ряд преимуществ в сравнении со своими аналогами:

Он позволит снизить приблизительно в 5 раз объём необходимых фотоэлементов при той же выходной мощности, что значительно снизит стоимость системы в целом. Но для работы данного концентратора необходим солнечный трекер.

Солнечный трекер – устройство, периодически ориентирующая солнечные панели или концентратор на солнце, в результате чего большее количество солнечных лучей достигают поверхности и вырабатывается больше электроэнергии.

При использовании солнечного трекера вырабатываемая в течение дня солнечными панелями мощность повышается примерно на 30 % [2]. Особенно заметен прирост в утренние и вечерние часы, которые как раз приходится на пик электропотребления. Поэтому солнечный трекер эффективен не только для концентраторов, но и для стандартных солнечных панелей.

В работе предложена реализация солнечного трекера, имеющего преимущества в сравнении со своими аналогами.

Благодаря разработанной управляющей плате без использования микроконтроллеров в качестве электропривода можно использовать коллекторный двигатель постоянного тока, поэтому питание электропривода осуществляется напрямую от аккумуляторной батареи, которая заряжается от солнечных панелей. Отсутствие инвертора для питания трекера делает систему проще и дешевле. На управляющей плате также реализован способ регулировки времени между включениями и ручной настройкой панелей в определённом направлении. Предлагаемые для трекера концевые выключатели обеспечивают большой угол поворота, позволяя эффективнее работать в утренние и вечерние часы. При этом простота конструкции и отсутствие программируемых частей задаёт высокий срок службы с низкой стоимостью сервисного обслуживания.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований с помощью экспериментальной модели солнечной установки [2], создана полноразмерная установка номинальной мощностью 190 Вт.

Даже при наиболее эффективной стационарной установке солнечной батареи, использование систем ориентирования на солнце позволяет достигнуть выигрыша в вырабатываемой мощности более чем в 30 %, с учётом расхода энергии на работу электродвигателя. Использование же концентратора с трекером позволит в 2 – 5 раз снизить стоимость солнечных установок.

Библиографический список

1. **Петрусёв А.С.**, Сарсикеев Е.Ж., Ляпунов Д.Ю. Энергоэффективная фотоустановка // Журнал Международных научных публикаций. – 2014. – № 8. – С. 399 – 404. – Режим доступа: <http://www.scientific-publications.net/ru/article/1000188/>.
2. **Петрусёв А.С.**, Юрченко А.В. Эффективный способ увеличения мощности солнечных установок // Физика. – 2014. – № 2 (960). – С. 4 – 8.
3. **Петрусёв А.С.**, Сарсикеев Е.Ж., Ляпунов Д.Ю. Разработка технических средств повышения эффективности солнечных установок // Вестник науки Сибири. – 2015. – № 15. – С. 77 – 82. – Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/1201>.

*Е.А. Елисеичев, асп.,
рук. А.В. Манин, к.т.н., доц.
(РГАТУ, г. Рыбинск)*

**БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК
ПИТАНИЯ С ПРЕЦИЗИОННЫМ АВТОРЕГУЛИРОВАНИЕМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Состояние вопроса качества электрической энергии, подводимой к высокоэнергоемким потребителям становится все более важным. Наличие высших гармонических составляющих тока, несимметрия питающей сети, процент реактивной мощности требуют современного схмотехнического взгляда по их компенсации, а в идеальном случае полного сведения на нет. Вышеперечисленные факторы весьма пагубно отражаются на процессах роста искусственного монокристалла лейкосапфира по методу Киропулоса [1]. Проблемным узлом в данном случае выступает – линейный источник питания (ИП), который не в состоянии устанавливать и поддерживать с прецизионной точностью температуру (T , °C), и также оптимальные режимы регулирования электрических параметров (I , A; U , В; P , Вт), что в совокупности влияет на ростовой процесс и соответственно на качество выходного слитка.

Реально, на настоящее время линейная схмотехника ИП не перспективна в силу своих недостатков (малый КПД, неприемлемые массогабаритные показатели и др.). Импульсные ИП (ИИП) отлично зарекомендовали себя, благодаря лучшим электрическим характеристикам (высокий КПД, низкие пульсации рабочего тока, высокая точность регулирования выходных параметров, большее время удержания и т. д.) [2, 3]. Преобразователи импульсного типа, с привязкой к ростовым установкам выращивания монокристаллов лейкосапфира недостаточно хорошо изучены и проработаны. Поэтому необходимо проанализировать аспект, связанный с обеспечением качества

электроэнергии ИИП, т. е. влияние источника на качество технологии процесса выращивания монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса.

В завершении сформулированы выводы о целесообразности и рентабельности применения ИИП в составе ростовой установки.

Библиографический список

1. **Багдасаров Х.С.** Высокотемпературная кристаллизация из расплава. – М.: Физматлит, 2004. – 160 с.
2. **Москатов Е.А.** Силовая электроника. Теория и конструирование. – К.: МК-Пресс, СПб.: Корона-ВЕК, 2013. – 256 с.
3. **FlexKraft** – техническое описание. – KraftPowercon Sweden AB, Sweden, 2012.

*А.Ф. Салихов;
рук. А.М. Гусячкин, к.т.н., доц.,
В.А. Игошин, ст. преп.
(КГЭУ, г.Казань)*

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВЕТИЛЬНИКА ПРИ ЗАМЕНЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП НА СВЕТОДИОДНЫЕ

На освещение в России расходуется 10 – 13 % от общего потребления электроэнергии. На промышленность приходится 29%, жилищный сектор – 26%, административные и общественные здания – 20 %. уличное освещение – 12 % всего объема потребления. Таким образом, 80 – 90 % электроэнергии на нужды освещения расходуется на территории городов и населенных пунктов. В организации энергоэффективного освещения объектов производственной и непроизводственной сферы имеется значительный потенциал энергосбережения за счет перехода к энергоэффективному освещению, в том числе к использованию светодиодных источников оптического излучения.

Нами проведен анализ замены люминесцентных ламп со световым потоком 205 лк и потребляемой мощностью 82 Вт на в стандартных светильниках типа «Армстронг». Для этого была собрана экспериментальная установка в которую вошли следующие элементы: светильник типа «Армстронг», автотрансформатор, измерительный комплекс К-505 и люксметр-пульсметр ТКА-ПКМ. (рис. 1).

При замене люминесцентных ламп на светодиодные не требуется покупка нового светильника, а необходимо лишь правильно соединить к контактам ламп. В светильнике уменьшается количество пусковой аппаратуры, при этом не требуется покупка дополнительных устройств, что обеспечивает экономию затрат при переходе от люминесцентных ламп на светодиодные.

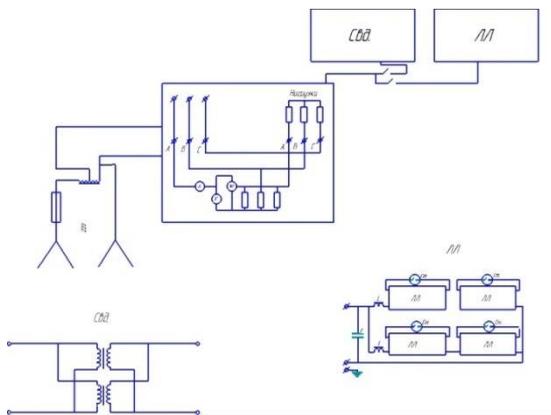


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В результате выполнения экспериментов было выявлено, что при непосредственном подключении светодиодных ламп к источнику электрической энергии величина светового потока составила 210 лк.

Проведены исследования влияния параллельной индуктивной нагрузки на показатели работы светодиодных источников оптического излучения. В качестве индуктивной нагрузки были применены стандартные дроссели из люминесцентных светильников. При параллельном подключении дросселей световой поток увеличился до 255 лк.

Таким образом:

1) при замене люминесцентных ламп на светодиодные, световой поток светильника увеличился на 50 лк, а потребляемая мощность снизилась с 82 до 46 Вт;

2) параллельное подключение индуктивной нагрузки в схему питания светодиодных источников света позволяет повысить световой поток при неизменном потреблении электрической энергии.

Е.Ю. Павлюк, студ.;
рук. Т.Н. Яковкина, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТА «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДОМ»

Одной из современных тенденций проектирования помещений жилого и муниципального характера является разработка и конструирование

таких проектов зданий, в которых комфорт планировочных решений сочетался бы с низкими затратами и энергоэффективностью [1]. По различным экспертным оценкам запасов основных источников энергии (нефти, газа и угля) в мире осталось максимум на 100 лет [1]. Практически половина потребления энергии в развитых странах приходится на жилые дома. Поэтому одним из основных методов ресурсосбережения становится улучшение энергоэффективности зданий [2]. Инновационным направлением в строительстве, пока мало распространенным в России, является создание энергоэффективных домов.

Территория Сибири и Дальнего Востока характеризуется следующими факторами: суровыми климатическими условиями, удаленностью многих районов от транспортной, энергетической инфраструктуры, сравнительно низкой материальной обеспеченностью населения, сравнительно низким уровнем комфорта проживания. Все это заставляет обратить особое внимание на создание энергоэффективных домов в условиях сибирского региона, что, несомненно, указывает на актуальность исследуемой проблемы.

Целью данной работы является разработка комплекса технических решений для повышения энергетической и экономической эффективности жилых и коммерческих помещений в Сибирском регионе. Предлагаемый комплекс технических решений формирует концепцию энергоэффективного дома по-сибирски. В результате проделанной работы будут достигнуты следующие результаты:

1. Повышение надежности энергоснабжения и качества жизни населения удаленных территорий;

2. Развитие инновационного производства с целью импортозамещения.

Энергоэффективный дом по результатам проделанной работы на данный момент включает в себя такие элементы как автономное электроснабжение и автоматизированную систему управления.

Первая часть работы посвящена разработке системы автономного электроснабжения для энергоэффективного дома в условиях сибирского региона. На базе Братского государственного университета была проделана работа по созданию следующих его элементов:

- гелио станции малой мощности, адаптированной к условиям работы в Сибири;

- фотоэлектрических преобразователей бюджетно-ценовой категории;

- контроллера точки максимальной мощности для работы в условиях низких температур.

В заключительной части статьи необходимо представить анализ экономической эффективности предлагаемой системы автономного электроснабжения. Расчет показателей выполнен для поселка Озерный Братского района. В настоящее время электроснабжение данного населенного пунк-

та осуществляется от дизельной электростанции, в течение дня организованы перерывы в снабжении для экономии топлива. Расход на топливо в год составляет до 23 млн. руб. Себестоимость электроэнергии составляет порядка 10 руб. за кВт·ч.

Рассматривалось автономное электроснабжение одного дома. Капитальные вложения – 100 тыс. руб. Для оценки эффективности и срока окупаемости предлагаемого технического решения были проведены расчеты, которые учитывают облачность в районе, издержки на обслуживание и ремонт, рост цен на горюче-смазочные материалы.

В результате был сделан следующий вывод: солнечная электростанция окупается в течение 10 лет и дальнейшие 15 лет работы принесет чистый дисконтированный доход 220 тыс. руб.

Таким образом, система «Энергоэффективный дом по-сибирски» – это гарантия удобства, комфорта и экономической выгоды, энергонезависимости, высокой ликвидности и инновационности,

Библиографический список

1. **Сопер М.Э.** Практические советы и решения по созданию «Умного дома» / Сопер М.Э. – М.: НТ Пресс, 2007. – 432 с.
2. **Тесля Е.А.** «Умный дом» своими руками. Строим интеллектуальную цифровую систему в своей квартире / Тесля Е.А. – СПб., 2008. – 224 с.

*А.В. Киричев, маг.
(ФГБОУ ВПО ЮУрГУ(НИУ), г. Челябинск);
рук. Г.В. Цепилов
(ЗАО «МПОТК «Технокомплект», г. Дубна)*

СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Основной целью исследовательских испытаний, являющихся одним из этапов проектирования любой фотоэлектрической станции (ФЭС), является поиск образцов фотоэлектрических модулей (ФЭМ) с наилучшими выходными характеристиками и наибольшим КПД. Именно это обеспечивает конкурентоспособность вырабатываемой ими электрической энергии по сравнению с электрической энергией, вырабатываемой традиционными источниками.

Такие исследовательские испытания проводятся Государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования Московской области «Международный университет природы, общества и человека «Дубна» (государственный университет «Дубна») и индустриальным партнером закрытым акционерным обществом «Межрегиональным производственным объединением технического комплектования «Технокомплект» (ЗАО «МПОТК «Технокомплект», г. Дубна) в рамках проведения прикладных научных исследований на тему «Разработка фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния с конкурентными на мировом рынке энергетическими и экономическими показателями» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по соглашению о предоставлении субсидии от 20.10.2014 № 14.607.21.0076 на выполнение прикладных научных исследований в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60714X0076.

Для проведения испытаний разработан и изготовлен стенд, блок-схема которого приведена на рис. 1.

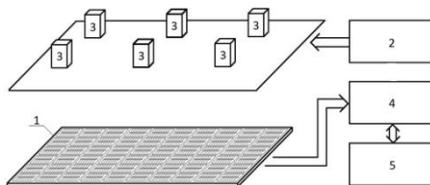


Рис. 1. Блок-схема стенда для проведения исследовательских испытаний: 1 – испытуемый образец ФЭМ; 2 – блок управления осветителем; 3 – блок-осветитель; 4 – блок нагрузки; 5 – измерительный блок

Элементы 2 и 3 представляют собой импульсный осветитель на основе шести ксеноновых дугоразрядных ламп-вспышек FalconEyes SS-150BJ [1], синхронизированных разветвителем Rekam MST-01 [2] и цифровым фотоаппаратом NIKON D810 [3]. Элемент 4 представляет собой нагрузку электронную программируемую PEL-73021 [4], а элемент 5 – цифровой осциллограф TDS3014C [5].

Таким образом, используемый стенд позволяет производить не только измерения основных характеристик ФЭМ, таких как ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, мощность и КПД, но и осуществлять предварительный контроль геометрических параметров ФЭМ в составе

модуля с помощью штангенциркуля с цифровым отсчётом и линейки измерительной металлической. Кроме того, имеется возможность контроля температур поверхности ФЭМ и окружающего воздуха в ходе испытаний с помощью измеритель температуры многоканальный прецизионный МИТ8.10М. Все приборы, входящие в состав стенда, внесены в государственный реестр средств измерений (СИ) и имеют действующий срок свидетельства.

Библиографический список

1. **Вспышка** студийная Falcon Eyes SS-150BJ [электронный ресурс]. – http://falcon-eyes.ru/catalog/studiynye_monobloki/vspyshka-studiynaya-falcon-eyes-ss-150bj/.
2. «**Разветвитель**» Rekam MST-01 для PC-разъема синхрокабеля, 6-ти канальный [электронный ресурс]. – <http://www.rekamshop.ru/148/>.
3. **Nikon D810 | Full-Frame DSLR | No optical Low-pass Filter** [электронный ресурс]. – <http://www.nikonusa.com/en/Nikon-Products/Product/dslr-cameras/D810.html?CID=>.
4. **Приложение** к свидетельству № 56630 об утверждении типа средств измерений. Нагрузки электронные серий PEL-72000, PEL-73000 [электронный ресурс]. – <http://dp.vniims.ru/TSI/B327-5F9B8DF74ADF.pdf>.
5. **Приложение** к свидетельству № 36708 об утверждении типа средств измерений. Осциллографы цифровые TDS3012C, TDS3014C, TDS3032C, TDS3034C, TDS3052C, TDS3054C [электронный ресурс]. – <http://dp.vniims.ru/TSI/BE21-02A98BBCA39A.pdf>.
6. **Измерители** температуры многоканальные прецизионные МИТ 8. Руководство по эксплуатации РЭ4211-102-56835627-10 [электронный ресурс]. – <http://www.iztech.ru/content/files/re/mit8.pdf>.

С.В. Сторожев, студ.;
рук. А.А. Тишков, к.н.т.
(ВИ(ИТ), г. Санкт-Петербург)

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В СЕТЯХ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ СЕВЕРНЫХ ГОРОДКОВ

Постоянно растущие тарифы на электроэнергию и особенности функционирования и жизнедеятельности северных городков делают систему наружного освещения (СНО) весьма затратной для бюджета таких населенных пунктов. Однако и без наружного освещения в темное время суток в современных условиях обойтись невозможно. Это связано с обеспечением безопасности передвижения населения, технологическими процессами, необходимостью поддержания и наведения порядка на улицах и ещё множеством причин.

Основной целью работы является определение возможности снижения затрат на эксплуатацию систем наружного освещения путем поиска и

внедрения современных технологий с учетом особенности жизнедеятельности северных городков.

Проведенные исследования на примере СНО городков Мурманской области позволили выявить ряд проблемных вопросов. Наиболее значимыми из них являются [1]:

- сетям освещения малых городков свойственно наличие большого количества групп осветительных приборов малой суммарной мощностью, рассредоточенных к тому же по большой площади;

- преобладание в зимнее время очень низких температур, порядка -30 °С и ниже, что негативно влияет на эффективность и срок службы источников света;

- малая продолжительность светлого времени суток в зимнее время (1 – 3 часа в сутки), что приводит к увеличению влияния человеческого фактора при ручном управлении уличным освещением;

Одним из наиболее быстро окупаемых и эффективных мероприятий в сфере энергосбережения и повышения энергоэффективности является модернизация систем наружного освещения [2].

В состав работ обычно входят следующие мероприятия:

- демонтаж текущих (неэффективных) светильников;

- монтаж энергоэффективных светильников;

- установка системы АСУНО (автоматизированная система управления наружным освещением).

Практика показывает, что при их реализации потенциал экономии электроэнергии в большинстве систем наружного освещения может составлять более 50 %. Например при замене светильников с лампами типа ДРЛ (400 Вт) на светильники типа ДНаТ (250 Вт), в которых установлены натриевые лампы высокого давления, уровень освещенности повышается на 22 %, а экономия на одной светоточке составляет порядка 580 кВтч в год.

Реальным способом экономии является четкое соблюдение графика включения-отключения освещения, такую задачу решает ввод автоматизированной системы управления (АСУ) наружным освещением. Пункты питания уличного освещения без системы АСУ включаются и выключаются на данный момент с большими разбросами по времени. Это обусловлено тем, что в системах уличного освещения северных городков используются ручное управление, при этом присутствует человеческий фактор, а именно, непрогнозируемое поведение человека, который самовольно может изменить график работы уличного освещения. Применение фотореле отчасти устраняет такую проблему, включение производится при снижении уровня естественной освещенности до 20 лк, а отключение - при ее повышении до 10 лк [3, 4].

В результате проведенного технического обследования проведенного в городках п. Печенга, п. Спутник, п. Оленья Губа, были выработаны общие рекомендации. Наиболее простым и наименее затратным способом управления наружным освещением, является организация в непосредственной близости от мест его подключения постов автоматического управления. Наиболее простым и надежным является схема управления, построенная на базе магнитных пускателей и фотореле. В зависимости от управляемой нагрузки стоимость комплекта начинается от 1500 рублей. Реализация самой простой схемы автоматического управления при мощности группы светильников 1 кВт может дать полную окупаемость через год. Расчетный экономический эффект при реализации в сетях наружного освещения только устройств автоматического управления в п. Спутник дал расчетную экономию в денежном эквиваленте согласно действующим тарифом ОАО «МРСК Северо-Запада» по Мурманской области 79718 рублей в год.

Библиографический список

1. **Тишков А.А.**, Павленок А.М. и др. Отчет НИР Организация внедрения метода автоматического управления в сетях наружного освещения военных городков п. Печенга, п. Спутник, п. Оленья Губа. – СПб ВИ(ИТ) ВА МТО, 2015.
2. **Правила** устройства электроустановок.
3. **СН 541-82.** Инструкция по проектированию наружного освещения городов, поселков и сельских поселений.

***И.А. Красковский, магистрант;
рук. О.Ю. Марьясин, к.т.н., доц.
(ЯГТУ, г. Ярославль)***

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ЗДАНИЙ

В настоящее время, системы освещения большинства административных и общественных зданий построены по так называемой «классической» схеме. Применяемые для освещения здания светильники (лампы дневного света), работа которых регламентируется лишь вручную (посредством стандартных клавишных выключателей), в итоге, светят не тогда, когда это необходимо, а на протяжении всего дня и, как следствие, создают дополнительный перерасход электроэнергии на освещение здания. При этом отсутствует анализ освещенности помещений естественным светом через оконные проемы, нет мониторинга человекопотока на лестницах, в коридорах, санузлах и у подъезда здания.

Энергосберегающие системы освещения (ЭСО) позволяют существенно снизить затраты на освещение и улучшить световые характеристики помещения. Такие системы наиболее актуальны для объектов, где свет должен гореть постоянно в качестве дежурного освещения (подъезды, подвалы, коридоры жилых и административных зданий, помещения промышленных предприятий и складов), а также для объектов, где качество света имеет большое значение в обеспечении комфортных условий для работы персонала (учебные заведения, магазины и т.п.).

Автор предлагает использовать при проектировании ЭСО подход, представляющий целый комплекс инженерных решений, включающий предварительный анализ помещений для наиболее рационального размещения светильников, определение оптимальных параметров системы освещения, использование адаптивной подстройки параметров ЭСО при изменении характеристик внешней среды.

Для определения варианта наиболее рационального размещения светильников используется свободно-доступная программа для расчета систем освещения DIALux [1]. Для определения оптимальных параметров системы освещения и анализа ее энергоэффективности авторами была разработана компьютерная модель перемещения людей внутри здания в системе AnyLogic. Система AnyLogic это среда компьютерного моделирования общего назначения, охватывающая основные направления моделирования: дискретно-событийное, системной динамики, агентное [2].

План помещения, с указанием расположения светильников, полученный в программе DIALux, используется в компьютерной модели перемещения людей внутри здания в системе AnyLogic. Вид модели в процессе имитации показан на рис. 1.

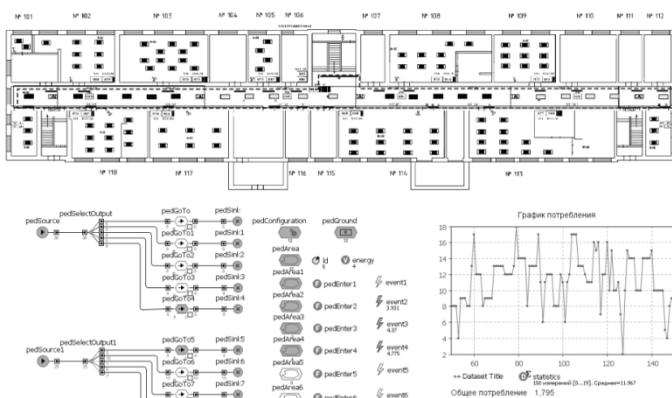


Рис. 1. Вид модели в процессе имитации в системе AnyLogic

Предложенный подход позволяет определить такие параметры ЭСО, как число и расположение светильников, а также оптимальную, с точки зрения энергосбережения и обеспечения комфортности, величину интервала времени горения светильников после срабатывания датчиков движения. Данная величина, определяет затраты электроэнергии на освещение помещений и зависит от таких характеристик, как интенсивность потока людей по коридорам здания и длительность их пребывания в помещениях. При изменениях данных характеристик, связанных со временем суток, временем года, графиком работы или другими факторами, возможна адаптивная подстройка параметров ЭСО на основе статистической информации, полученной от датчиков движения.

Библиографический список

1. **DIALux** – расчет и проектирование систем освещения. URL: <http://www.dialux-help.ru/> (дата обращения: 07.12.2015).
2. **AnyLogic** – инструмент многоподходного имитационного моделирования. URL: <http://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 07.12.2015).

А.А. Брындин, А.О. Харьков, студ.;
рук. Д.А. Полкошников, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Статические характеристики нагрузки (СХН) позволяют учитывать зависимость её активной и реактивной мощностей от напряжения и частоты при моделировании системы. На практике СХН используют при расчёте установившихся режимов для определения устойчивости системы. Полученные в результате этих расчётов данные используются системными диспетчерами.

Для получения СХН обязательно должен быть использован так называемый «натурный эксперимент», поэтому студентам важно знать, как он проводится и что из себя представляет. С этой целью ранее была разработана лабораторная работа по снятию и изучению СХН различных видов освещения. Следующим шагом является разработка лабораторной работы по изучению СХН асинхронного двигателя (АД).

Для лабораторной работы использован комплект типового лабораторного оборудования «Модель комплексной электрической нагрузки» (ИПЦ «Учебная техника», г. Челябинск), который позволяет использо-

вать реальные физические модели нагрузки и источников питания. Это позволяет студентам максимально приблизиться к изучению объектов электроэнергетики.

Блочная схема опыта показана на рис. 1. В качестве источника питания используются два генератора, работающих параллельно, так как мощность АД превышает мощность одного генератора. Использование генераторов позволяет регулировать как частоту, так и напряжение. К источнику питания подключается АД, частота и напряжение измеряются с помощью частотомера и вольтметра; активная и реактивная мощность измеряются ваттметром и варметром соответственно.

С помощью данной схемы получены СХН для АД. После подготовки методических указаний можно рекомендовать данную лабораторную работу к применению в учебном процессе.

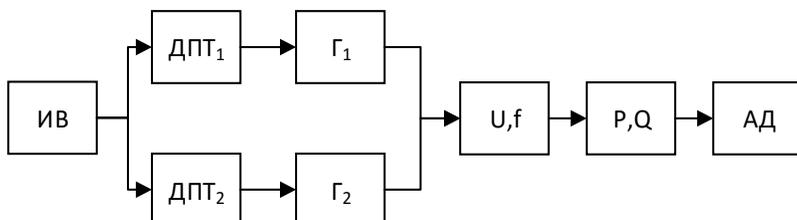


Рис. 1. Блочная схема опыта

Библиографический список

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

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

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ (ИФВЭ)

Электрические нагрузки ИФВЭ получают питание от ПС «Протон» энергосистемы Калужской области и оказывают влияние на качество электроэнергии в питающих сетях из-за резкопеременного режима их работы.

Нелинейными и резкопеременными нагрузками являются:

- кольцевой электромагнит ускорителя У-70 (КЭМ У-70), получающий питание от ПС У-70, которая связана ЛЭП 220 кВ с ПС «Протон»;
- кольцевой электромагнит У-1,5 (установка «Бустер»), получающий питание от ПС «Протвино»;
- экспериментальная установка протонно-реагентного генераторного комплекса (ПРГК- 100), получающая питание от ПС «Протвино».

Схема электроснабжения У-70 с указанием пяти преобразовательных агрегатов ПВА1- ПВА5 показана на рис 1.

Целью работы является исследование режимов работы ускорителя У-70, схема электроснабжения которого была модернизирована в 2014 г., и оценка его влияния на качество электроэнергии в питающей сети с учетом нового ГОСТ-32144-2013 [1].

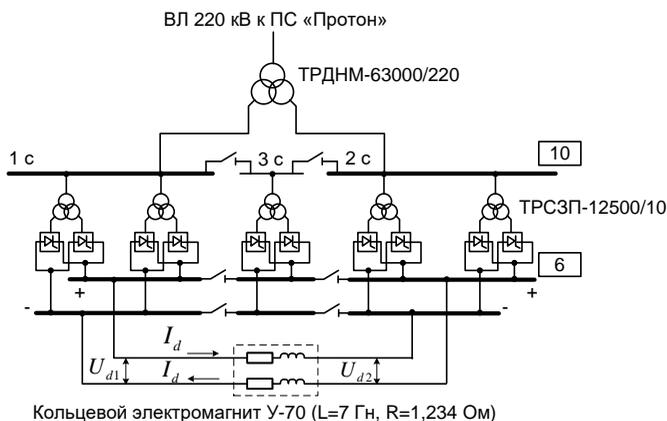


Рис. 1. Схема электроснабжения ускорителя У-70

В схеме питания У-70 имеются четыре анодных трансформатора 10/6 кВ мощностью 12,5 МВ·А (на всех трансформаторах обмотки низкого напряжения расщеплены на 2 ветви). Для уменьшения уровней гармонических искажений в питающей сети реализована 12-пульсная схема выпрямления.

Установлено, что У-70 при работе непрерывно с энергией пучка протонов 50 ГэВ имеет циклически повторяющийся (Т цикла \cong 10 с) график потребления активной и реактивной мощности с пиковыми величинами 65 МВт и 71 Мвар.

Режим работы У-70 характеризуется четырьмя этапами:

этап 1 – тиристорные преобразователи КЭМ У-70 работают в выпрямительном режиме;

этап 2 – преобразователи обеспечивают стабилизацию поля КЭМ;
 этап 3 – перевод преобразователей в инверторный режим (спад поля, часть накопленной в КЭМ энергии возвращается в сеть).

Максимальные расчетные значения мощностей на соответствующих этапах работы ускорителя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения мощностей, потребляемых ускорителем

Режим работы	P, МВт	Q, Мвар	S, МВ·А
Этап 1	65	38	75,3
Этап 2	28	71	76,3
Этап 3	- 47	60	76,2

Изменения реактивной мощности, вызывающие, как известно, колебания напряжения в питающей сети, составляют $\Delta Q = 71$ Мвар.

Размах изменения напряжения в сети 220 кВ при расчетной мощности КЗ в этой сети ($SKЗ \cong 3500$ МВ·А) составит значение

$$\delta U \cong (\Delta Q / SKЗ) \cdot 100 \% = (71 / 3500) \cdot 100 \% = 2 \%$$

За цикл 10 с по нормам [1] предельно допустимое значение размаха составляет $\delta U_{\text{доп}} = 1,25 \%$.

Результаты работы будут использованы при разработке мероприятий, направленных на обеспечение качества электроэнергии в системе электроснабжения предприятия.

Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» (введен с 01.07.2014 г.).

*А.О. Любимова, магистрант;
 рук. М.И. Соколов, к.т.н., доц.
 (ИГЭУ, г. Иваново)*

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАРУЖНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Сети наружного освещения (НО) являются неотъемлемой частью инженерной инфраструктуры любого города или поселка. Затраты на электроэнергию в этих сетях оцениваются около 30 % от всех затрат на освещение и с учетом дополнительных затрат на обслуживание этих сетей составляют весьма значительную долю в структуре затрат муниципальных бюджетов [1].

В настоящее время полезное применение энергии, в первую очередь, связывают с энергосбережением. Анализ функционирования сетей наружного освещения показал, что здесь имеется мощный потенциал для этого. Однако, это требует финансирования энергосберегающих программ в этой области, связанных также и с вопросами модернизации городского освещения. Предполагается, что постепенная модернизация устаревших источников света в России приведет к высвобождению до 10 % энергогенерирующих мощностей и сократит затраты на оплату электроэнергии на нужды освещения в среднем до 60% от уровня расходов до замены освещения [2].

Переход на качественно новый уровень энергоэффективного освещения диктуется потребностями экономики России в целом. В последние годы появились новые технологии в системах уличного освещения, а также новые классы энергоэффективных светильников, что позволяет получить большой экономический эффект от реализации энергосберегающих мероприятий. Потребность в капитальной реконструкции уличного освещения назрела еще в 90-х годах, но не могла быть реализована из-за финансовых проблем и частично из-за технических. Многие регионы начали в рамках Федеральной целевой программы «Энергосбережение России» разрабатывать свои концепции модернизации и энергосбережения. Такие программы уже имеются в Архангельске, Екатеринбурге, Самаре, Иванове и др. городах. Во всех программах имеются мероприятия, нацеленные на приведение в соответствие городского освещения с современными требованиями и, в частности, внедрение систем централизованного управления освещением с использованием современных каналов связи. При этом абсолютно везде ставятся задачи снижения электропотребления и достижения существенных показателей экономии, повышения мер безопасности.

В сетях управления уличным освещением городов имеется сложная разветвленная структура и множество центров питания. Поэтому, в этих системах предусматривается дистанционное управление наружным освещением. Такая система включается с единого центрального диспетчерского пункта (ЦДП).

Автоматизированная система управления наружным освещением (АСУНО) предназначена для контроля, автоматизации сбора информации об исполнительных элементах, сбора информации со счетчиков электроэнергии и передачи ее в диспетчерские пункты.

АСУНО благодаря своим свойствам и функциям позволяет значительно повысить эффективность эксплуатации наружных осветительных установок и решить проблемы энергосбережения.

Принципиально выполнять регулирование светового потока можно двумя способами: управляя каждым светильником индивидуально, либо осуществляя групповое управление линией наружного освещения. Для передачи сигнала могут применяются известные способы [2].

Возникает вопрос о сроках окупаемости таких проектов. Так по данным [2] при индивидуальном управлении удорожание на один светильник составит от 600 до 800 руб. в зависимости от мощности. Для установки с 75 светильниками НО по 400 Вт каждый общие затраты составят примерно 60 тыс. руб. Экономия электроэнергии в год порядка 35 тыс. кВтч, т.е. примерно 112 тыс. руб./год. (при тарифе 3,2 руб./кВтч). Окупаемость – 6 месяцев.

При групповом управлении (нужна установка шкафа управления стоимостью примерно в 620 тыс. руб.) для той же установки НО из 75 светильников экономия составит 48 тыс. кВтч /год, или 153,6 тыс. руб. Окупаемость в этом случае составит чуть более 4-х лет.

Такие системы абсолютно тиражируемы и представляют из себя по сути типовый проект, Таким образом, АСУНО сегодня – это реальный и перспективный инструмент энергосбережения.

Библиографический список

1. **Материалы** сайта www.es.ua.
2. **Материалы** сайта www.ekonom-energo.ru.

А.И. Мухин, А.Н. Ивашина, А.С. Смирнова, студ.;
рук. А.А. Шульпин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЗА СЧЕТ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Неотъемлемой частью механизма энергосбережения являются контроль и учет. В процессе управления энергосбережением значение этой функции трудно переоценить. В первую очередь это связано с увеличением информационной насыщенности системы управления и необходимостью использования для целей контроля и учета современных средств вычислительной техники и измерительных систем.

Современная система учета электроэнергии представляет собой совокупность измерительных комплексов (ИК), установленных на энергетиче-

ческом объекте. Средства учета электроэнергии не ограничиваются только счетчиками электроэнергии, а представляют собой сложную совокупность устройств, соединенных между собой по установленной схеме и обеспечивающих измерение и учет электроэнергии, включая: счетчики электроэнергии, измерительные трансформаторы тока, измерительные трансформаторы напряжения, автоматизированные информационно-измерительные системы учета электроэнергии (АИИС УЭ).

Выполнение правил учета электроэнергии, достигается только при соответствии систем учета электроэнергии у потребителей следующим требованиям: обеспечению точности получаемой информации, оснащенности средств учета электроэнергии, оперативности учета электроэнергии.

Основным препятствием при организации системы учета электроэнергии являются недопустимо высокие погрешности измерительных комплексов учета электроэнергии. Погрешность получаемой информации зависит от правильного выбора типа и класса точности средств измерений, от соблюдения правил эксплуатации и контроля за ними, от реальных условий работы средств измерений, а также от ошибок при регистрации и обработке показаний приборов.

Достаточность средств учета (степень оснащенности ИК) достигается установкой минимального количества ИК у потребителей для обеспечения необходимой степени разделения учета электроэнергии. Для проведения реальной работы по организации расчетного и технического учета электроэнергии необходимо наладить системы учета электроэнергии на всех уровнях системы электроснабжения:

Оперативность учета электроэнергии обеспечивается только при наличии АИИС УЭ.

Внедрение АИИС УЭ на энергетических объектах позволяет:

1) повысить точность учета электроэнергии. При этом предприятие получает более достоверную информацию об энергопотреблении. В результате производится точное сведение балансов, нахождение потерь, контроль качества электроэнергии и выявление неучтенных потребителей;

2) «навести порядок» во внутризаводском электрохозяйстве, выявить производственные участки с нерациональным использованием электроэнергии и разработать мероприятия по энергосбережению;

3) перейти на расчет за электроэнергию с энергоснабжающей организацией по дифференцированным тарифам за счет установки счетчиков, учитывающих электроэнергию по разным тарифным зонам;

4) перейти на расчет по фактически потребляемой мощности за счет оптимизации энергопотребления и управления производством (т.е. снизить потребляемую мощность на предприятии в часы пиковых нагрузок

энергосистемы, спрогнозировать нагрузку и уменьшить заявленную мощность на следующий расчетный период, защититься от штрафов, отключить электроприемники, работающие вхолостую);

5) компенсировать затраты на разницу тарифов для абонентов и суб-абонентов, при расчете тарифа на потребляемую электроэнергию с энергоснабжающей организацией;

6) повысить надежность энергоснабжения предприятия;

7) автоматизировать процесс коммерческого учета;

8) автоматизировать финансово-банковские расчеты с потребителями.

Без совершенной системы учета и контроля расхода электроэнергии значительно ухудшается точность нормирования, растет неопределенность информации используемой в технико-экономических расчетах, что негативно влияет на выбор энергосберегающего оборудования, приводит к перерасходу электроэнергии и материальных ресурсов. Экономически обоснованное применение средств контроля и учета расхода электроэнергии позволяет повысить организацию и управление энергосбережением на энергетическом объекте, а также повысить эффективность программно-целевого планирования энергосбережением.

Проведение работ по эффективному использованию электроэнергии на энергетических объектах теряет практический смысл при несоблюдении требований к системам учета электроэнергии.

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

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА

В крупных городах все более острой становится проблема недостатка генерируемых мощностей, возникают трудности при подключении нового объекта к существующим электрическим сетям ввиду отсутствия резерва мощности, либо их удаленности от энергосистемы. Строительство новой электрической станции – это долгосрочная и дорогостоящая перспектива, поэтому новой альтернативой является применение малых ТЭЦ или, как их еще называют, распределенной генерации (РГ).

В системах электроснабжения города актуальными являются источники с комбинированным производством электроэнергии и тепла, расположенные в непосредственной близости от конечного потребителя.

Целью работы является сравнительный анализ технических и экономических характеристик различных типов когенерационных установок.

Проведен анализ размещения РГ, удельного расхода топлива на выработку кВт·ч электроэнергии, удельных капиталовложений на производство электрической и тепловой энергий, влияния на окружающую среду.

Газопоршневые установки более эффективны по сравнению с газотурбинными установками, как имеющие более высокий КПД, который практически не изменяется в диапазоне нагрузки 50 – 100 % и другие преимущества.

Рассмотрены примеры применения РГ в системах электроснабжения г. Москвы и Московской области, г. Ярославля.

Результаты исследований планируется использовать при проектировании систем электроснабжения городов.

Библиографический список

1. **Аптекарь Д.И.** и др. Оценка рентабельности проекта когенерации // Новости электротехники. – 2000. – № 6.
2. **ВОНТА GROUP.** Пришло время малой энергетики // Новости электротехники. – 2003 – № 2 (20).
3. **Газопоршневые** мини-ТЭЦ. // <http://www.aerkom.ru/miniTES/sravnenie/>.
4. **Кадыков Ю.А.** Малая и нетрадиционная энергетика. Направления развития // Новости электротехники. – 2006. – № 2.

Е.А. Попова, студ.;
рук. С.В. Балдов, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРУЗКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Одной из задач, решаемых при эксплуатации городских электрических сетей, является оценка загрузки элементов электрических сетей 0,4 кВ и силовых трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ, а также определение возможности подключения новых абонентов к существующим электрическим сетям. Особенно актуальной данная задача становится в настоящее время в связи со снижением капитальных вложений в развитие существующих городских электрических сетей и ростом нагрузок бытовых потребителей.

Согласно [1], для существующих сетей уровень загрузки их элементов, в том числе и силовых трансформаторов, может быть определён по

результатам фактических замеров. Для этих целей выполняются токовые замеры с использованием переносных токоизмерительных клещей, фиксируя значения токов по фазам один раз. По возможности измерения выполняются во время максимальных нагрузок в «режимные дни». Однако, как показывает практика, зачастую замеры совмещаются с проведением регламентных работ в трансформаторных подстанциях. В результате такого подхода не удаётся получить реальной картины по загрузке элементов электрической сети, что может быть показано на следующем примере.

На рис. 1 приведен поминутный суточный график электропотребления городской трансформаторной подстанции за 20.03.2015, питающей группу 5-этажных жилых домов. Так, например, нагрузка в период с 19:00 до 20:00 изменяется в два раза, а соответственно при выполнении измерений в данный промежуток времени разброс по загрузке силового трансформатора может различаться в два и более раз.

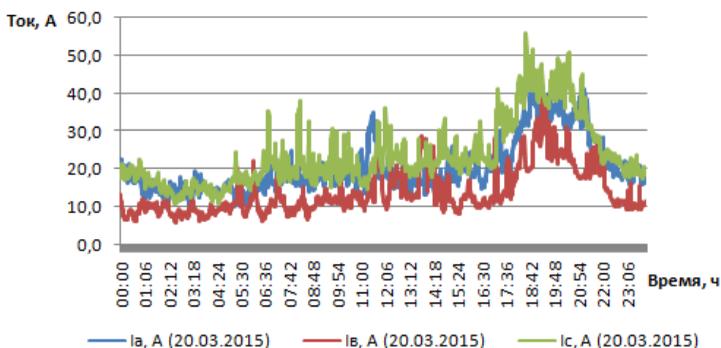


Рис. 1. Пример суточного графика изменения нагрузки трансформатора 6/0,4 кВ

В табл. 1 приведен анализ изменения нагрузки в период с 20.03.2015 по 22.03.2015 по фазам на вводе 0,4 кВ силового трансформатора 6/0,4 кВ городской электрической сети, питающего группу 5-этажных жилых домов.

Таблица 1. Анализ изменения нагрузки по фазам на вводе 0,4 кВ силового трансформатора 6/0,4 кВ городской электрической сети, питающего группу 5-этажных жилых домов

Дата	20.03.15			21.03.15			22.03.15		
Характеристика	Ia, A	Ib, A	Ic, A	Ia, A	Ib, A	Ic, A	Ia, A	Ib, A	Ic, A
Имакс	45,7	39,5	56,0	46,6	45,9	59,2	55,2	39,2	58,9
Имин	10,4	6,0	11,1	9,5	5,5	8,7	10,3	7,0	8,5
Иср	20,6	14,0	23,6	22,2	15,6	26,7	21,8	14,6	26,1
DI	47,1	38,3	74,6	50,8	46,4	113,2	53,1	26,1	105,9
СКО	6,9	6,2	8,6	7,1	6,8	10,6	7,3	5,1	10,3
Имакс/Имин	4,4	6,6	5,0	4,9	8,4	6,8	5,4	5,6	6,9

Расчеты с использованием фактических суточных графиков показывают, что для получения достоверных значений с вероятностью 0,9 необходимо выполнить токовые замеры не менее трех раз с интервалом между измерениями в 15 минут. В реальных условиях эксплуатации с учетом большого количества трансформаторных подстанций и ограниченного штата сотрудников это не реально.

Таким образом, для повышения точности определения загрузки элементов городской электрической сети, в том числе силовых трансформаторов, оценки возможности подключения дополнительных абонентов к существующим городским электрическим сетям необходимо:

- 1) получение типовых суточных графиков для различных групп бытовых потребителей;
- 2) использование переносных измерительных комплексов с возможностью записи параметров электропотребления в память, например AR.5, ЭРИС, Энергомонитор и др.

Библиографический список

1. СП 31-110-2003. Проектирование и монтаж жилых и общественных зданий. – М.: Госстрой России, 2003 – 60 с.

И.В. Прокопьев, студ.;
рук. А.Е. Аржанникова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ЗАМКНУТОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

При эксплуатации электрической сети оптимизируют мгновенный режим работы с целью минимизации эксплуатационных издержек. При этом достаточно рассмотреть лишь часть издержек, зависящую от режима – потери активной мощности, то есть может быть использован простой критерий в виде $\Delta P = \sum \Delta P_i \rightarrow \min$.

Уменьшение потерь мощности и напряжения достигается за счет рациональной эксплуатации СЭС и оптимизации режимов в результате:

- компенсации передаваемой по сети реактивной мощности;
- применения более высоких номинальных напряжений;
- предотвращения появления уравнильных мощностей в замкнутых неоднородных сетях (деление сети, изменение параметров ветвей и по-

вышение ее однородности, согласование коэффициентов трансформации трансформаторов на питающих подстанциях, принудительное распределение мощностей с помощью вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ)).

На базе комплекта типового лабораторного оборудования производства Челябинского ИПЦ «Учебная техника» разработан алгоритм проведения экспериментов по изучению способов оптимизации режима распределительной электрической сети замкнутого типа в рамках выполнения лабораторной работы для студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» по курсу «Оптимизации систем электроснабжения». Исследования на физической модели показали, что

- не весь перечень способов минимизации потерь активной мощности в неоднородной замкнутой сети доступен;
- зависимость изменения потерь в сети от степени компенсации имеет минимум при мощности компенсирующих устройств значительно меньшей, чем суммарная реактивная нагрузка сети.

Поэтому принято решение дополнить лабораторную работу исследованиями на математической модели. А точнее – на имитационной модели, созданной с помощью программы Энергия, разработанной на кафедре Электрических систем ИГЭУ. Тем более, что в комплект лабораторного стенда входит ноутбук. Исследования на имитационной модели сходны с физическим экспериментом, но обладают большей маневренностью и наглядностью, так как схема составляется из элементов с параметрами реального электрического оборудования. В обоих типах моделей и активно-индуктивная, и емкостная нагрузки заданы статическими характеристиками, то есть зависят от уровня напряжения на шинах их подключения.

Для исследования выбрана классическая схема кольцевой сети, состоящей из эквивалентированной системы, питающей понижающей двухтрансформаторной подстанции, двух потребительских подстанций и трех соединяющих их линий (рис. 1). Рассматривается подключение регулируемых компенсирующих устройств на стороне высшего напряжения потребительских подстанций. Нагрузки заданы статическими характеристиками.

С помощью имитационной модели предполагается применить продольно-поперечное регулирование напряжения с помощью ВДТ для компенсации уравнительного потока мощности, появляющегося в замкнутой сети из-за ее неоднородности. И более корректно подобрать оптимальную мощность компенсирующих устройств для минимизации потерь активной мощности в сети (рис. 2).

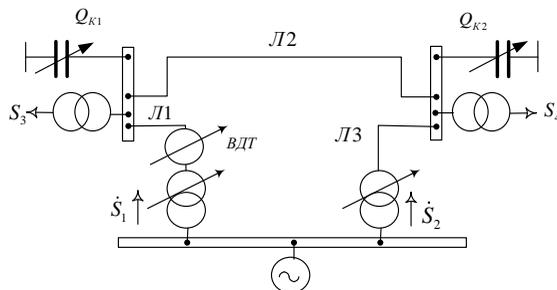


Рис. 1. Принципиальная схема замкнутой сети с компенсирующими устройствами

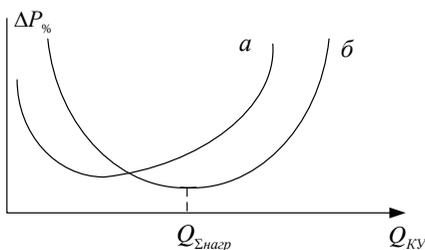


Рис. 2. Целевая функция – зависимость потерь активной мощности от степени компенсации: а) при физическом, б) при математическом моделировании

Р.С. Сотчева, Н.Е. Захаров, А.А. Медведев, студ.;
рук. А.А. Шульпин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЭЛЕКТРОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Электросбережение на энергетических объектах возможно только при формировании и последующей реализации программ энергосбережения на отдельных энергетических объектах, для чего необходимо создание соответствующей базы работ по энергосбережению. Основные этапы работы по электросбережению на энергетических объектах приведены на рис. 1.

Электросбережение на энергетических объектах не имеет практического смысла, если работа по экономии электроэнергии не будет правильно организована. Комплексный подход к организации работы по электросбережению на энергетических объектах состоит из пяти направлений:

1. Установление значений среднего расхода электроэнергии (средних норм расхода электроэнергии) с использованием методики нормирования электроэнергии по отдельным видам оборудования, участкам и т. д.



Рис. 1. Основные этапы работы по электросбережению на энергетических объектах

На электропотребление основного технологического оборудовании влияет большое количество самых разнообразных технологических, технических, энергетических и других факторов. Многочисленные факторы, одновременно влияющие на электропотребление технологического оборудования, могут быть объединены в три группы:

а) параметры заправки оборудования (определяются производственными планами, состав и качество сырья (зависят от поставщиков), полуфабрикатов и ассортимента продукции (зависят от состояния оборудования, квалификации работников и т.д.);

б) энергетические показатели качества электроэнергии.

в) состояние технологического и электрического оборудования (уровень обслуживания, ремонтная база, профилактика, ремонтная база, срок службы, интенсивность эксплуатации и т. д.);

2. Организация достоверного учета за электропотреблением, контроля за производительностью оборудования и соблюдением выполнения заданных технологических процессов, установленных планом.

Для проведения реальной работы по электросбережению необходимо наладить системы учета электроэнергии на всех структурных уровнях объекта. Система учета электроэнергии должна соответствовать следующим требованиям: достаточность (оснащенность приборами учета), достоверность (точность), оперативность.

3. Составление фактических и расчет нормализованных электробалансов и их анализ для определения величин и причин экономии или перерасхода электроэнергии по каждому виду оборудования, комплекту, участку, цеху, производству.

4. Организация оперативного контроля за выполнением установленных средних значений электропотребления любого вида оборудования.

В процессе проведения оперативного контроля выясняются причины перерасхода электроэнергии по структурным подразделениям, устанавливается электрооборудование, имеющее энергопотребление выше установленного среднего значения электропотребления, и принимаются меры к их устранению. Оперативным контролем одновременно выявляется также электрооборудование, имеющее энергопотребление ниже среднего электропотребления. Для этого электрооборудования выявляются факторы, обеспечивающие более экономичную работу оборудования.

5. Разработка мероприятий по экономии электроэнергии на следующий период времени. Внедрение мероприятий по электросбережению на энергетических объектах позволит уменьшить потребление электроэнергии, снизить издержки и повысить экономическую эффективность производства.

На основе показателей электропотребления, полученных в процессе проведения оперативного контроля, учитывая эффективность проведенных мероприятий, устанавливаются новые прогрессивные нормы расхода электроэнергии и вновь осуществляется контроль за выполнением этих норм.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ И РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При проектировании системы электроснабжения (СЭС) последовательно решаются две задачи синтеза:

1. структурная оптимизация – определение лучшего перечня элементов СЭС и способов связи между ними, составление модели;
2. параметрическая оптимизация – определение оптимальных значений внутренних параметров СЭС.

Технико-экономическое обоснование проектных решений по СЭС, учитывая небольшие сроки сооружения, проводится по критерию минимума приведенных затрат с учетом технических ограничений. В качестве ограничений могут выступать балансы мощностей в узлах, требования ГОСТ по допустимым показателям качества, например, отклонению напряжения на шинах электроприемников.

В рамках изучения дисциплины на практических занятиях выполняются ручные расчеты простых схем с двумя оптимизируемыми переменными, так как оптимизационные расчеты весьма громоздки и трудоемки.

Существуют различные программные комплексы, имеющие в своем распоряжении необходимый инструментарий для построения математических моделей и решения оптимизационных задач. В помощь студенту, выполняющему подобные расчеты, может быть предложено программное обеспечение для инженерных расчетов MathCAD и Excel.

Разработан алгоритм исследования математических моделей при изучении способов оптимизации структуры и режима системы электроснабжения в рамках выполнения лабораторных работ для студентов направления подготовки кадров высшей квалификации 13.06.01 – Электро- и теплотехника с направленностью «Электрические станции и электроэнергетические системы» по дисциплине «Специальные вопросы оптимизации структур и параметров систем электроснабжения».

Тема первой лабораторной работы – изучение методов линейного программирования, в частности транспортной задачи, и применение их для выбора оптимальной конфигурации (трасс и сечений ЛЭП) системы электроснабжения с помощью Excel и MathCAD.

Тема второй лабораторной работы – изучение классического метода оптимизации и метода Лагранжа и применение их для выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств с целью минимизации потерь мощности и обеспечения нормируемого уровня напряжения в системе электроснабжения. Выполнение задания лабораторной работы предусматривает использование также двух программных продуктов – MathCAD и Excel. В них создается математическая модель системы электроснабжения, применяется метод. Поскольку оба программных продукта уже изучались студентами, нет необходимости в ознакомлении и можно сразу приступить к исследованиям.

Проанализирована работа в двух программных комплексах MathCAD и Excel.

Решение задачи с помощью MathCAD требует понимания алгоритма метода оптимизации, постоянного участия исследователя, фактически освобождает его только от рутинных алгебраических расчетов, что сходно с решением задачи с помощью калькулятора, но позволяет решать задачи большей размерности. Наглядны все этапы решения задачи: ввод исходных данных, формирование целевой функции и ограничений, операции с ними, получение результата.

Excel требует ввода основных элементов математической модели, выполняет оптимизационные расчеты заложенным в него методом оптимизации и выдает оптимальные значения параметров. Сам процесс расчета

не визуализируется, происходит без участия исследователя, что не дает возможности для анализа закономерностей и освоения метода оптимизации.

Каждый программный продукт имеет свои особенности, сочетание их дает более глубокое понимание сущности и возможностей оптимизации. Проведенные с их помощью расчеты показали совпадение результатов при одинаковых исходных данных. Применение разработанных алгоритмов позволяет легко проводить научные исследования в проектируемой СЭС.

На данный момент разработаны методические указания к двум лабораторным работам. Планируется, что в ходе изучения дисциплины кроме задач линейного и нелинейного программирования таким же образом будут рассмотрены задачи дискретного программирования, многокритериальные задачи.

Знания и навыки, полученные при выполнении лабораторных работ могут стать основой для курсовой работы, в которой студенты должны будут самостоятельно создать СЭС с оптимальной структурой и параметрами и обеспечить экономичность режимов ее работы.

A.A. Bryndin, A.V. Hristolyubsky, A.O. Harkov, stud.;
supervisor D.A. Polkoshnikov, sen. teacher,
advisor A.A. Egorova, PhD
(ISPU, Ivanovo)

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STEADY-STATE LIGHTING LOAD CHARACTERISTICS

Steady-state load characteristics (SLC) mean active and reactive load power variation as a function of voltage and frequency. Voltage steady-state load characteristics are used in calculation of electrical network modes and to control them, instability estimation of load nodes with the aim of reliability and efficiency increase in electric power systems.

For determination of SLC the full-scale experiment should be used, that's why there is an actual necessity for students to know: what is the real experiment and how to conduct it. For this purpose, we worked out the laboratory work for determination SLC of different kinds of light sources. It can be incandescent, LED or luminescent lamps etc.

The standard laboratory equipment set «The model of complex electrical load» (manufacturing engineering centre «Uchebnaya tekhnika», Chelyabinsk) is used in the laboratory work. The distinguishing feature of the project is the usage of the real physical load models and power supply sources. It allows students taking the course to learn how to work with real facilities of power industry.

The principle scheme of the experiment is shown in fig. 1. Synchronous generator is used as a three-phase energy source. It helps us to control voltage and frequency level. Blocks with different kinds of lamps are connected with energy source. The level of voltage and frequency is measured by voltmeter and frequency meter. Wattmeter and varmeter measure active and reactive power.

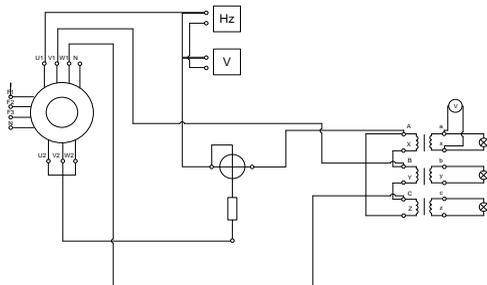
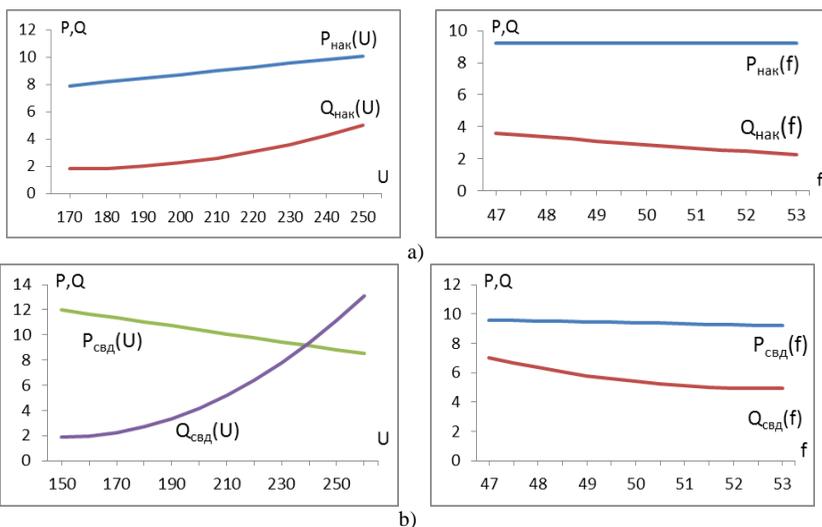


Fig. 1. The principle scheme of experiment

SLC for three kinds of lamps are shown in fig. 2: incandescent lamps (a), LED lamps (b) and luminescent lamps (c). The laboratory work could be recommended for application in teaching process after preparation of necessary methodical guidelines.



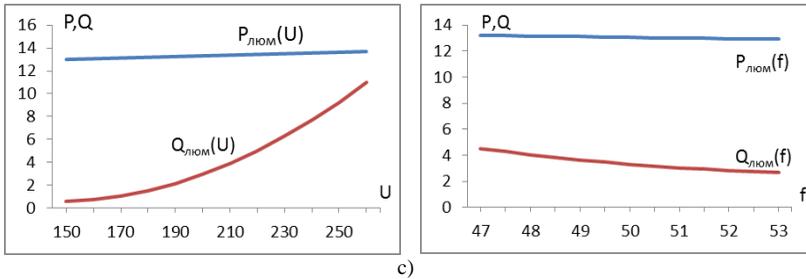


Fig. 2. Voltage and frequency steady-state load characteristics for: a) incandescent lamps; b) LED lamps; c) luminescent lamps

СЕКЦИЯ 14

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Председатель – к.т.н., доцент **Лебедев В.Д.**
Секретарь – ассистент **Шадрикова Т.Ю.**

В.Р. Иванова, к.т.н., И.Ю. Иванов, к.т.н.
(КГЭУ, Филиал ОАО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана, г. Казань)

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ ПРИ ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Погрешности трансформатора тока (ТТ) оказывают большое влияние на работу продольных дифференциальных защит линий (ДЗЛ) ввиду опасности их неселективного срабатывания при коротком замыкании (КЗ) вне зоны действия.

Для отстройки от небалансов, вызванных неодинаковостью условий работы измерительных ТТ, в существующих устройствах ДЗЛ применяется торможение от сравниваемых токов – увеличение порога срабатывания дифференциального тока I_D в зависимости от тормозной величины I_T . На рис. 1 представлена типичная тормозная характеристика ДЗЛ.

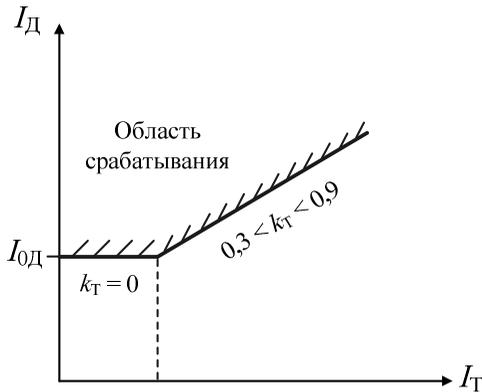


Рис. 1. Тормозная характеристика ДЗЛ

Срабатывание ДЗЛ происходит при выполнении условий:

$$I_{д} \geq K_{т} \cdot I_{т}, I_{д} \geq I_{0д},$$

где $K_{т}$ – коэффициент торможения, определяющий угол наклона характеристики; $I_{0д}$ – начальный ток срабатывания ДЗЛ.

Как видно из тормозной характеристики, с увеличением тормозной величины, пропорциональной увеличению сравниваемых токов, загроубляется уставка срабатывания $I_{д}$. Эта мера препятствует неселективному срабатыванию при внешних КЗ, которые могут произойти вследствие нарушения баланса токов из-за неодинакового насыщения ТТ.

Основным недостатком защит с торможением от сравниваемых токов является недостаточная чувствительность при внутренних КЗ, сопровождающихся расхождением по фазе сравниваемых токов. Это обусловлено самим принципом торможения, при котором тормозная величина пропорциональна току КЗ независимого от того, имеется небаланс токов, могущий привести к срабатыванию при внешнем КЗ, или нет.

При внутренних КЗ фазовый сдвиг между токами может быть достаточно большим с учётом разницы углов результирующих сопротивлений источников питания относительно места КЗ, влияния режима нагрузки и переходного сопротивления в месте КЗ.

Для устранения указанного недостатка целесообразно вычислять величину торможения в зависимости от реальных погрешностей ТТ в переходных режимах с учётом нелинейности характеристик ТТ.

Исходными данными для определения погрешности ТТ могут служить величины измеряемых токов, номинальные данные трансформатора тока (мощность, класс точности, номинальная предельная кратность), фактически подключённая нагрузка вторичных цепей ТТ (устройства, соединительные кабели).

Рассчитанные на каждом конце линии погрешности ТТ складываются, образуя максимально возможный расчётный небаланс ΔI , и формируется тормозная величина, соответствующая расчётному небалансу, то есть уставка по дифференциальному току $I_{д}$ загроубляется на величину ΔI .

Указанное позволит произвести адаптацию уставки защиты к текущим значениям сравниваемых токов с учётом характеристик ТТ, обеспечив существенно большую чувствительность ДЗЛ. Увеличение чувствительности происходит благодаря введению существенно меньшей тормозной величины, соответствующей лишь максимальному небалансу при внешнем КЗ с текущим значением подводимых токов.

И.Ю. Ефремова, Д.Г. Ефремов, асп.;
рук. И.З. Глушкин, д.т.н., проф.
(НИУ МЭИ, ЗАО «ОРЗАУМ», г. Москва)

УПРАВЛЯЕМАЯ НАСТРОЙКА ПУСКОВОГО ОРГАНА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

Перегрузка сечения энергосистемы может привести к нарушению статической устойчивости. Предотвращение нарушения устойчивости энергосистемы осуществляет система противоаварийной автоматики (ПА). ПА реализует: выявление аварийного события (пусковые органы), дозировку управляющих воздействий, исполнение управляющих воздействий.

В настоящее время наибольшее внимание уделяется модернизации автоматики дозировки управляющих воздействий. Главным подтверждением этому является создание и усовершенствование централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА). Основная цель данной системы – разработка адаптивного принципа выбора управляющих воздействий ПА. Управления пусковыми органами в ЦСПА не осуществляется. В данной работе рассматриваются пусковые органы ПА, выявляющие перегрузку сечения энергосистемы, представляющую опасность для сохранения устойчивости параллельной работы энергосистем.

В настоящее время пусковые устройства ПА имеют жестко заданную уставку, рассчитанную для наиболее тяжелого режима работы энергосистемы. При этом часто происходят излишние срабатывания пусковых органов, что снижает пропускную способность сечений и экономическую эффективность электропередач [1, 2].

В данных условиях важной и актуальной задачей является разработка управляемого пускового органа ПА, способного адаптироваться к текущему режиму работы энергосистемы, а именно разработка алгоритма управления пусковым органом ПА, и структурной схемы ПА, содержащей управляемый пусковой орган.

Предлагается следующий алгоритм управления пусковым органом:

1. Ввод исходных данных, полученных от системы измерения, а также данных от системы телесигнализации.
2. Идентификация режима по данным измерений и сигналам телесигнализации.
3. Эквивалентирование схемы и расчет параметров, необходимых для расчета запаса по статической устойчивости.

5. Расчет текущего режима, оценка запаса по статической устойчивости, определение оптимальной траектории утяжеления.

6. Утяжеление режима до предельного по условию статической устойчивости режима.

7. Расчет максимально допустимых перетоков мощности по сечениям, в которых установлены пусковые органы ПА.

8. Выбор уставок пусковых органов ПА. Уставка устройства, установленного в данном сечении, рассчитывается по значению максимально допустимого перетока мощности в сечении в предельном по статической устойчивости режиме.

9. Передача уставки пусковому устройству.

10. Переход к пункту 1.

Кроме того предлагается структурная схема ПА, содержащей управляемый пусковой орган. Схема работает следующим образом: регистраторы переходных режимов, устанавливаемые на объектах электроэнергетической системы, обеспечивают синхронизированные по времени измерения требуемых параметров энергоприсоединения, которые передаются на верхний уровень в программно-технический комплекс (ПТК ПА) с помощью оборудования связи. ПТК ПА обеспечивает (указанным выше способом): расчет параметров для идентификации режима на основе измерений от регистраторов переходных процессов; корректировку модели на основе рассчитанных значений; расчет текущего режима; расчет запасов устойчивости; утяжеление режима; определение максимально-допустимых перетоков мощности в контролируемых сечениях; формирование задания для корректировки уставок пусковых устройств. Сформированные задания посредством оборудования связи передаются к пусковым устройствам.

При такой настройке пусковые органы ПА адаптируются к режиму работы сети, что исключает их излишние срабатывания, повышает пропускную способность сечения и экономическую эффективность электропередачи. Использование управляемых пусковых органов особенно актуально на длинных линиях электропередачи с промежуточными отборами мощности.

Библиографический список

1. **Иофьев Б.И.** Функционирование противоаварийной автоматики // Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. Сб. научных трудов ин-та «Энергосетьпроект». – М.: Энергоиздат, 1982.

2. **Глускин И.З., Иофьев Б.И.** Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I. – М.: Знак, 2009.

*Д.Г. Ефремов, И.Ю. Ефремова, асп;
рук. И.З. Глушкин, д.т.н., проф.
(НИУ МЭИ, ЗАО «ОРЗАУМ», г. Москва)*

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТАНЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В последнее время в противоаварийной автоматике все чаще используются управляющие воздействия, основанные на управлении накопителями энергии (сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИНЭ), аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ), суперконденсаторы, маховиковые накопители). Данные управляющие воздействия позволяют предотвратить нарушение устойчивости в энергосистеме, без отключения потребителя и без снижения пропускной способности сечений.

В области применения накопителей энергии остаются не решенными следующие вопросы: использование групп накопителей энергии для повышения устойчивости энергосистем, выбор оптимального сочетания накопителей и их параметров. В данной работе решаются вопросы применения групп накопителей энергии различного вида для повышения динамической устойчивости станции при коротких замыканиях (КЗ), выбора параметров накопителей.

Для решения данных вопросов необходимо рассмотреть модель энергосистемы с накопителями энергии. Накопители подключаются в сеть через устройство регулирования мощности. В качестве данного устройства применяется тиристорный преобразователь, который, в зависимости от углов управления, может работать в режиме выпрямителя или инвертора [1, 2].

При рассмотрении динамической устойчивости станции важной задачей является максимально быстро устранить небаланс мощности, вызывающий снижение силы электромагнитного сопротивления на валу генератора и приводящий к его разгону. Накопители энергии создают дополнительную нагрузку на валу ротора генератора и предотвращают его разгон. Необходимо определить параметры накопителя, которые бы позволяли обеспечивать устойчивость параллельной работы генераторов. Данными параметрами являются:

- энергоемкость накопителя (МДж);
- максимальная мощность накопителя (МВА);
- максимальный ток накопителя (кА);
- максимальная скорость изменения тока накопителя (кА/с).

Указанные параметры могут быть вычислены аналитически, а также экспериментально следующим способом: в точку подключения накопителя подключается активное сопротивление на потенциал земли. Через некоторое время после возникновения КЗ выключатель подключает сопротивление. Изменяя величину сопротивления и длительность его подключения, экспериментально подбираются такие значения, чтобы не нарушалась устойчивость генератора.

Исследования применения СПИНЭ на шинах станции при коротких замыканиях позволили сделать следующие выводы: достичь необходимого быстродействия при заданной энергоемкости СПИНЭ для сохранения динамической устойчивости не всегда возможно. Предлагается решить данную проблему с помощью применения параллельно соединенных двух или более накопителей, которые при заданной суммарной энергоемкости способны обеспечить необходимое быстродействие.

Анализ применения суперконденсаторов показал, что данные накопители могут использоваться для сохранения динамической устойчивости станций благодаря высоким динамическим характеристикам и достаточной энергоемкости. Объединение суперконденсаторов в батареи позволит получить необходимые характеристики накопителя.

Рассмотрение применения АББМ показало, что свойства данного накопителя не позволяют использовать их для поддержания динамической устойчивости станции из-за очень низких динамических характеристик. Для того, чтобы достичь необходимых динамических характеристик нужно использовать очень большое количество аккумуляторных батарей, что экономически нецелесообразно.

Исследование применения маховикового накопителя показало, что данный накопитель в виде бесщеточной машины постоянного тока с постоянными магнитами совместно с маховиком из углепластика позволяют сохранить динамическую устойчивость станции при коротких замыканиях. Этому способствует высокая перегрузочная способность машин постоянного тока, также важной особенностью является возможность запастись значительную энергию в маховике при относительно небольших его размерах.

Библиографический список

1. **Глускин И.З.**, Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I – М.: Знак, 2009.
2. **Иофьев Б.И.** Функционирование противоаварийной автоматики // Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. Сб. научных трудов ин-та «Энергосетьпроект». – М.: Энергоиздат. 1982.

*А.В. Речков, А.В. Абрамов, З.Г. Зухрабов, магистранты;
рук. М.Ф. Носков, д.т.н.
(СШФ СФУ, п.г.т. Черёмушки)*

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ГИДРОАГРЕГАТА

Основной задачей построения релейной защиты гидроагрегатов является обеспечение ее эффективного функционирования по возможности при любых видах повреждений, предотвращение развития повреждений и значительных разрушений защищаемого оборудования, а также предотвращение нарушений устойчивости в энергосистеме.

Защиты гидроагрегатов выбраны по [1 – 4]. Алгоритм их действия и схема разрабатывается индивидуально для каждого гидроагрегата, однако есть общие принципы их построения. Для этого была составлена структурная схема релейной защиты гидроагрегата, в соответствии с [1 – 4], по общим принципам и с алгоритмом действия, представленная на рис. 1.

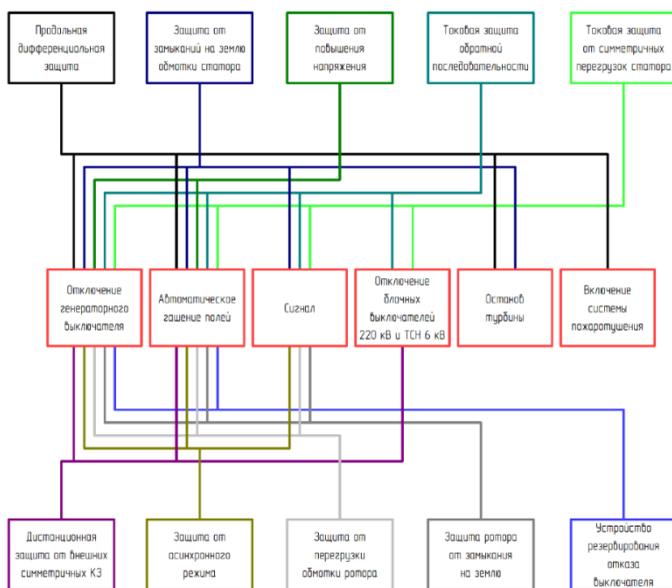


Рис. 1. Структурная схема релейной защиты гидроагрегата

В соответствии с ПУЭ принимаются к установке на гидрогенераторе, следующие защиты:

- продольная дифференциальная защита генератора (от междуфазных КЗ в обмотках статора генератора и на его выводах);
 - защита от замыканий на землю обмотки статора генератора;
 - защита от повышения напряжения (для предотвращения недопустимого повышения напряжения на выводах обмотки статора при сбросах нагрузки);
 - дистанционная защита от внешних симметричных КЗ;
 - защита от асинхронного хода с потерей возбуждения;
 - защита от симметричной перегрузки обмотки статора;
 - защита от перегрузки обмотки ротора, контроль длительности форсировки;
 - защита ротора от замыканий на землю в одной точке;
 - токовая защита обратной последовательности от внешних несимметричных КЗ и перегрузок;
 - устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ) генератора;
- Для обеспечения общего резервирования защит целесообразна установка двух одинаковых комплектов защит, дублирующих друг друга, имеющих раздельное питание по цепям постоянного тока и напряжения.

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок. 7-е издание / Ред. А.М. Меламед. – М.: НЦ ЭНАС, 2011. – 552 с.
2. **Электрическая** часть гидроэлектростанций: проектирование: учеб. пособие / Д.А. Куценов, И.Ю. Погоняйченко. – 2-е изд. – Саяногорск: Сиб. федер. ун-т; Саяно-Шушенский филиал, 2009.
3. **Гидроэнергетическое** и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций: справ. пособие: в 2 т./Под ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева. Т. 1. Основное оборудование гидроэлектростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 400 с.
4. **Гидроэлектростанции** / В.И. Брызгалов, Л.А. Гордон. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. – 541 с.

С.С. Дементьев, асп.;
рук. А.А. Шилин, к.т.н., доц.
(ВолгГТУ, г. Волгоград)

НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЁДОБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Повышение надёжности воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) является одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики.

ки. Это объясняется частой повреждаемостью воздушных линий, что делает их наиболее уязвимым элементом электрической сети. При этом самые тяжёлые последствия отказов ВЛЭП в виде 70 – 80 % от годового аварийного недоотпуска электроэнергии имеют место в период гололёдообразования при обрывах проводов [2].

Минимизация риска возникновения гололёдных аварий достигается широким внедрением информационно-измерительных систем (ИИС) мониторинга гололёдообразования. Среди них практическое применение получили системы, основанные на измерении тяжения провода с гололёдными отложениями, а также импульсного ВЧ-зондирования проводов линии [2]. Недостатками данных устройств контроля является отсутствие возможности определения момента начала формирования гололёдных отложений и оценки интенсивности их нарастания. Перечисленные ограничения могут быть устранены в рамках нейрокompьютерной системы мониторинга гололёдообразования, отслеживающей не размеры гололёдной муфты на проводе, а метеорологические условия окружающей среды, приводящие к возникновению отложений.

К основным климатическим факторам, влияющим на процесс гололёдообразования, относятся: температура окружающей среды, содержание воды в единице объёма воздуха, размер водного атмосферного аэрозоля, скорость водного аэрозоля, угол встречи водного аэрозоля с поверхностью провода [2].

Таким образом, предлагаемая система мониторинга должна содержать датчики температуры, влажности воздуха, а также скорости и направления ветра. Метеодатчики располагаются вблизи закрытого шкафа, закреплённого на кронштейнах на стойке опоры (рис. 1) и содержащего аналогово-цифровой преобразователь, GSM/GPRS-модем, блок питания.

Для подзарядки аккумуляторной батареи используется система бесконтактного отбора мощности от проводов ВЛЭП, включающая в себя первичный преобразователь системы отбора мощности, коаксиальный кабель, выпрямительный диодный мост и стабилизатор напряжения, выходные зажимы которого подключаются к вклю-

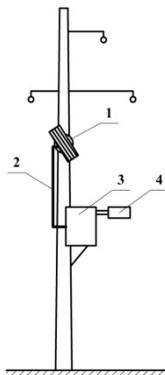


Рис. 1. Схема исполнения ИИС: 1 – первичный преобразователь системы отбора мощности, 2 – коаксиальный кабель, 3 – закрытый шкаф, 4 – метеодатчики

чѐнным параллельно нагрузке и аккумулятору. Первичный преобразователь выполнен в виде многовитковой катушки, закреплѐнной на изоляторе на стойке опоры (рис. 1). Более подробно устройство и принцип действия данной системы описывается соответствующим патентом [1].

Аналоговые сигналы от метеодатчиков поступают на вход АЦП и оцифрованными отправляются на вычислительный центр диспетчерской службы. С использованием специального ПО, программно симулирующего искусственную нейронную сеть (ИНС), определяется возможная толщина гололёдных отложений на соответствующем участке линии. ИНС представляет собой персептрон, обученный с использованием данных о гололёдообразовании, собираемых местной метеостанцией. Эти данные включают в себя примеры значений эквивалентной толщины стенки гололёда и соответствующие им величины температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра.

Полученные с помощью ИНС данные используются для расчѐтной проверки механической прочности проводов ВЛЭП в текущей обстановке и, в случае необходимости, принятия оперативных мер по предотвращению отказа воздушной линии на соответствующем участке.

Библиографический список

1. Пат. 2414035 Российская Федерация. Геворкян В.М., Геворкян С.В., Казанцев Ю.А., Яшин И.А. Система отбора мощности от токов трёхфазной линии передачи высокого напряжения: 2011. Бюл. N 7.

2. Шилин А.Н. Радиоэлектронная система контроля обледенения воздушных линий электропередачи / А.Н. Шилин, И.И. Литвин // Датчики и системы. – 2012. – № 1. – С. 47 – 50.

А.Г. Ханевич, студ.;
рук. И.В. Новац, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»

В БНТУ на кафедре «Электрические станции» накоплен большой опыт по разработке компьютерных программ, предназначенных для исследования аварийных режимов электроэнергетического оборудования методом вычислительного эксперимента и получения информационных сигналов для проверки работоспособности защит.

В данной работе рассматриваются примеры реализации компьютерных программ выработки входных сигналов дифференциальной токовой

защиты трехфазного трехобмоточного силового трансформатора с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta/\Delta-11$.

Компьютерные программы, которые разрабатывались в период массового внедрения первых ПЭВМ, работающих под управлением операционной системы DOS, представляют собой исполняемые модули, разработанные на алгоритмическом языке FORTRAN. В них используются текстовых и графические операторы для вывода информации на экран монитора (рисунок 1) в виде текста, рисунков и осциллограмм расчетных параметров (токов, напряжений и др.) [1].

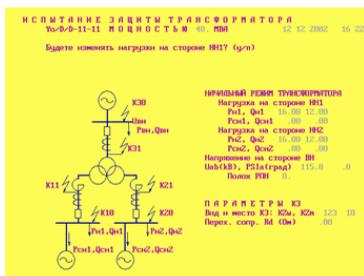


Рис. 1. Экран работы DOS-программы

Исходные данные и результаты расчетов сохраняются во внешних файлах, которые также могут редактироваться и визуализироваться текстовыми и графическими редакторами.

В настоящее время в связи с использованием в ПЭВМ новых типов микропроцессоров и современных многооконных операционных систем типа Windows-7 с развитым графическим и мультимедийным интерфейсом применение подобных расчетных программ становится затруднительным.

Однако опыт применения таких программ в учебном процессе, использование в проектных институтах и фирмах, разрабатывающих микропроцессорные защиты, показывает их актуальность и необходимость адаптации к современным ПЭВМ [2].

Поэтому был разработан новый программный комплекс для расчетов режимов трехфазного трехобмоточного трансформатора (рисунок 2), в котором используется откомпилированный в системе программирования Fortran Power Station фортрановский модуль расчетной программы в виде *dll*-модуля. В нем сохранена программная реализация алгоритма расчета математической модели трансформаторной подстанции [1, 2], а все графические построения и интерактивные функции графического интерфейса реализуются с помощью команд и операторов системы объектного программирования DELFI.

Сравнение двух программных комплексов проводилось с помощью визуализации и анализа результатов расчетов, сохраняемых во внешних файлах, в математическом пакете MathCad. Для количественного сравнения сопоставлялись действующие значения токов на отдельных интервалах времени.

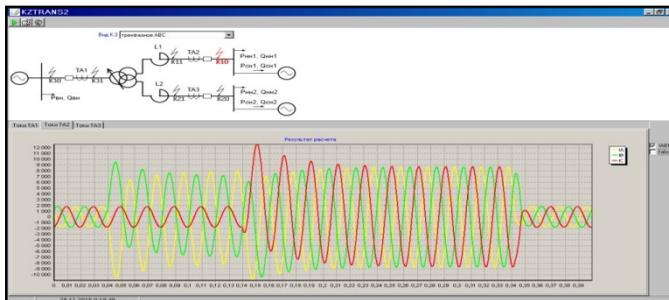


Рис. 2. Интерактивное окно нового программного комплекса

Сравнительный анализ результатов программных комплексов показал, что их результаты расчета полностью идентичны. Исходя из этого, можно сказать, что новый программный комплекс для расчета режимов трехфазного трехобмоточного трансформатора отвечает всем поставленным задачам, имеет проверенную практикой достоверность ранее разработанных программ и может применяться на любых современных ПЭВМ.

Библиографический список

1. **Романюк Ф.А.** Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф.А. Романюк, В.И. Новаш – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.
2. **Новаш И.В.** Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И.В. Новаш, Ф.А. Романюк. – Мн.: БНТУ, 2013. – 226 с. – ISBN 978-985-550-236-5.

*И.С Кожуховский, Д.А. Калугин, магистранты;
рук. М.Ф. Носков, д.т.н.
(СШФ СФУ, п.г.т. Черёмушки)*

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

В качестве предложения по усовершенствованию было принято решение заменить синхронизатор шведско-швейцарской компании

ABBSwitchsyncF236 [1] на разработанный алгоритм управления, который будет выполняться в шкафу управления выключателя.

Рассмотрим алгоритм действия реактированной линии на примере фазы А.

На фазе А, как и на всех остальных фазах, установлен орган определения максимального и минимального значения напряжения (для благоприятного отключения выключателя) [2]. На элементы «1» и «2» будет поступать сигнал о присутствии реактора в линии, но так как на элементе «1» сигнал будет проходить с инверсией, и на выходе будет иметь логический ноль, дальше этого элемента сигнал не пройдет. В то же время на выходе элемента «2» будет логическая единица, при условии, что срабатывает орган определения максимального напряжения, это обуславливается тем, что коммутация включения реактированной линии в момент времени с максимальным напряжением наиболее благоприятна. Далее сигнал проходит на элемент «3», через элемент «3». На элементе «4», помимо сигнала с элемента «3» будет подаваться сигнал на включение. Далее сигнал будет проходить на элементы отвечающие за регулирования выдержки времени DT1, DT2, DT3, в то же время блокируя фазы В и С. Команда на срабатывание пускового реле КСС1 будет проходить через элемент DT1, который имеет настраиваемую выдержку времени, для того чтобы отключить фазу в максимальный момент времени. Так как схема трехфазная, срабатывание реле КСС2 будет проходить через выдержку времени 6,66 мс, которая устанавливается элементом DT2. Срабатывание реле КСС3 срабатывает через выдержку времени 13,33 мс, которая устанавливается элементом DT3.

На рис. 1 представлена схема разработанного алгоритма управления высоковольтными выключателями.

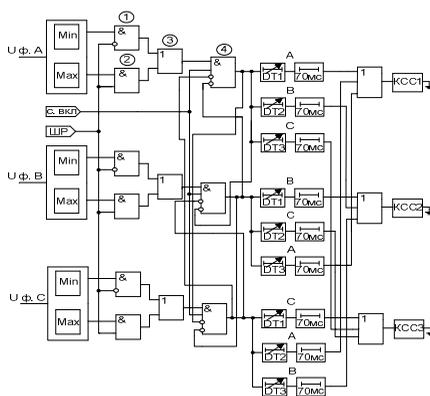


Рис. 1. Схема алгоритма управления высоковольтных выключателей

На рис. 2, а изображена осциллограмма схемы с реактированной линией, а на рис. 2, б с неактивной линией

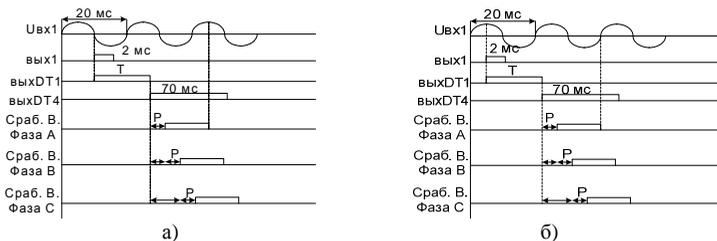


Рис. 2. Осциллограммы схемы

В случае линии без реактора сработает орган определения минимального напряжения, то есть на элемент «3» будет проступать сигнал от элемента «2». Остальной алгоритм будет протекать аналогичным способом.

Библиографический список

1. **Техническая** информация «SwitchsyncF236» [Электронный ресурс] // Компания «ABB». – Режим доступа: <http://www.abb.ru/product/db0003db002618/aac97c97bc40d704c12576230027f368.aspx?productLanguage=ru&country=RU&tabKey=2>.

2. **Кожуховский И.С., Попов В.А.** Разработка предложения по усовершенствованию алгоритмов управления силовыми выключателями // III международный молодежный форум. Т. 3. –Томский политехн. ун-т, г. Томск, 2015.

Н.И. Ежиков, слесарь-электрик
(АО «ЭСК ЧТПЗ»),

Е.И. Климов, магистрант;

рук. В.С. Павлюков, к.т.н., доц.

(ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), Челябинск)

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО АНАЛИЗА ТОКОВ

При введении в эксплуатацию нового крупного потребителя электроэнергии зачастую присутствует необходимость перенастройки систем защиты, находящихся в ячейке КРУ подстанции, что является весьма трудоемкой операцией как с точки зрения расчета нового потребления, так и с точки зрения программирования микропроцессорной системы защиты либо перенастройки релейной схемы защиты линии.

При использовании программируемых микропроцессорных систем защиты предлагается использование системы анализа токов, подключен-

ная к выводам измерительных трансформаторов тока на защищаемых фазах и к программируемому блоку защиты. При запуске данной системы в нее вводятся текущие значения уставок имеющейся защиты. В течении продолжительного времени данная система находится в процессе анализа текущего энергопотребления, узнавая таким образом разброс между значением уставок и средним значением энергопотребления для дальнейшего соблюдения процентного соотношения. Затем постепенно, дабы не превысить текущие значения уставок защиты, происходит ввод новых потребителей через определенные промежутки времени, в течении которых высчитывается новые значения среднего энергопотребления и, на их основе, новые значения уставок систем защит с сохранением процентного соотношения между реальными и уставочными значениями, после чего происходит сигнализация оперативному персоналу КРУ о необходимости временного отключения ячейки, после которого происходит перепрограммирование имеющейся системы защит.

Библиографический список

1. **Potential** of artificial neural networks in power system operation / Damborg M.J., El-Sharkawi M.A., Aggoune M.E., Marks II R.J. // IEEE Int. Symp. Circuits and Syst., New Orleans, La, May 1-3, 1990. Vol. 4 - New York (N.Y.), 1990. – С. 2933 – 2937.

2. **Hammons T.Y.** Artificial Intelligence in Power system En-gineering // IEEE Power Eng. Review. Febr. 1994.

*Б.М. Гийев, асп.
(НИУ «МЭИ», г. Москва);
рук. М.Д. Додхудоев, к.т.н., доц.
(ТТУ, г. Душанбе)*

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ АГРЕГАТОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Электроснабжение особых групп электроприемников [1] следует осуществлять таким образом, чтобы при выводе в длительный ремонт любого элемента системы электроснабжения или при чрезвычайных ситуациях, сохранялось питание этих электроприемников от двух независимых источников. Для этой цели, кроме двух основных источников постоянного питания, требуется третий независимый источник минимальной мощности. В качестве третьего источника могут быть использованы агрегаты бесперебойного питания. (АБП), располагаемые в непосредственной близости от особых групп электроприемников.

АБП применяются для резервирования питания устройств вычислительной техники, автоматики, систем управления непрерывными процессами, систем безопасности, систем связи, охранной и пожарной сигнализации, медицинского оборудования и др.

В данной работе разработано схема устройство автоматического включения агрегатов бесперебойного питания (УАВАБП).

Существуют многообразные схемы УАВАБП [2]. Каждая из них имеет свои недостатки. Нами была сделана попытка восполнить этот пробел.

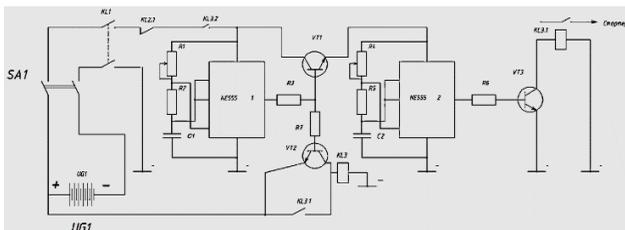


Рис. 1. Структурная схема устройство АВАБП

Принцип действия УАВАБП основано на исчезновении напряжения на основной линии сети. При уменьшении ($0,75U_n$) или исчезновении напряжения на основной линии, промежуточное реле KL отключается и замыкает свой контакт KL1. (KL в нормальном режиме получает питания от основного источника питания) и происходит пуск устройство.



Рис. 2. График, поясняющий принцип работы устройства

Устройство разработано на кафедре «Электроснабжения» Таджикском Техническом Университете. Испытание проведено с дизельным агрегатом типа Tiger, мощностью 5 кВт и показало надежную работоспособность АРП. Время пуска агрегата зависит от надежной работы систем зажигания, а также стартера самого агрегата и находится в пределах 1,5 –

2 с. При первом положительном импульсе, если агрегат запустился, то последующих импульсов блокируются (рис. 2). Эти три импульса обеспечивают трехразовую пусковую пуску агрегата.

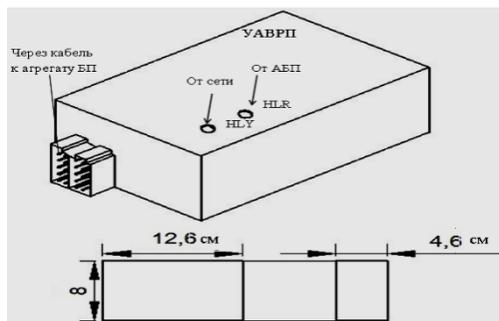


Рис. 3. Внешний вид и габаритные размеры устройства АБП

Библиографический список

1. ПУЭ 6-е изд. перераб. и доп. – М.^ Энергоатомиздат, 1989.
2. Ромаш Э.М. Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1981.

А.А. Глазачев, маг.;
рук. А.В. Белоглазов, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ НА ПОДСТАНЦИИ

На большинстве российских подстанций морально и физически устарели средства контроля и управления технологическим процессом. На первый взгляд, моральный износ аппаратуры контроля и управления не приносит каких-либо экономических потерь, но если рассмотреть эту проблему более подробно, то это совершенно не так. Основной целью автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) является повышение экономической эффективности технологических процессов трансформирования и распределения электрической энергии, повышения надежности и качества электроснабжения потребителей подстанции за счет оптимизации процессов оперативного управления, ремонтов, планового технического обслуживания, сокращения коли-

чества аварий путем их своевременного предупреждения и локализации. Положительный эффект достигается за счет объединения различных средств автоматизации технологического объекта управления в интегрированную информационную и управляющую систему. АСУ ТП является основным средством управления технологическим процессом. [1].

В качестве примера внедрения современной АСУ ТП рассматривается подстанция Вертковская 110 кВ. В новой АСУ ТП на подстанции Вертковская 110 кВ предусмотрены автоматизированные рабочие места (АРМ) оперативного персонала по обслуживанию РЗА (релейная защита и автоматизация), персонала по обслуживанию АСУ ТП.

Система также выполняет функции телемеханики, что обеспечивает выдачу сигналов ТС, и ТИ (телесигнализация и телеизмерение соответственно) в единый информационный комплекс.

АСУ ТП на подстанции Вертковская 110 кВ состоит из комплекса «Компас ТМ 2.0», АРМ (ОВБ (оперативно выездной бригады), инженера АСУ ТП), АРМ РЗА, сети микропроцессорных измерительных преобразователей и микропроцессорных устройств РЗА [2].

«Компас ТМ 2.0» и АРМ ОВБ совместно составляют программно-технический комплекс (ПТК) для контроля и управления оборудованием подстанции. ПТК позволяет осуществлять сбор информации ТС, ТИ и выдачу команд ТУ (телеуправление) с АРМ ОВБ или АРМ диспетчера [3].

Задачи планирования режимов реализуются путем автоматизированного подсчета количества переключений по коммутационным аппаратам с учетом коммутируемых токов. Производится также мониторинг режимов работы трансформаторов, включая температурные режимы. На основе паспортных характеристик и ретроспективного анализа работы коммутационного оборудования производится прогноз по необходимости. Для ведения оперативной мнемосхемы подстанции предусмотрена электрифицированная мнемосхема, отражающая состояния оборудования подстанции в режиме онлайн. По автоматизированному оборудованию сигналы несоответствия на мнемосхеме подстанции формируются автоматически [4].

Таким образом, внедряемые средства вычислительной техники способны разгрузить человека от выполнения как рутинной работы, связанной с большим числом простых операций по обработке крупных массивов информации, так и оказать ему помощь в выполнении задач, связанных с оптимизацией технологического процесса на подстанции, и, как следствие, уменьшить экономические издержки. При этом роль человека в АСУ ТП остается весьма существенной, так как ряд ответственных задач по принятию решений в силу их сложности не поддается формализации, и их выполнение не может быть полностью автоматизировано [5].

Библиографический список

1. РД 34.20.501-95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации.
2. **Мошкарин А.В.**, Девочкин М.А., Шельгин Б.Л., Рабенко В.С. Анализ перспектив развития отечественной теплоэнергетики / Под ред. А. В. Мошкарина / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2002. – 256 с.
3. РД 153-34.1-35.127-2002. Общие технические требования к программно-техническим комплексам для АСУ ТП подстанций.
4. РД 34.35.120-90. Основные положения по созданию автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) подстанций напряжением 35-1150 кВ.
5. **Постановление** Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 29 октября 2003 г. № 89-э/1 «О тарифах на электрическую энергию (мощность), поставляемую на федеральный (общероссийский) оптовый рынок электрической энергии (мощности)».

А.В. Сидорова, студ.;
рук. Ю.В. Целебровский, д.т.н., проф.
(НГТУ, г. Новосибирск)

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНОСТИ
В СЕТЯХ 6...35 КВ ПРИ НАЛИЧИИ
И ОТСУТСТВИИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ**

Введение. Опыт эксплуатации электрических сетей 6 – 10, 35 кВ показывает, что значительная доля нарушений нормальной работы этих сетей обусловлена повреждениями изоляции относительно земли, которые приводят к возникновению однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) с токами в десятки ампер. Перенапряжения, которыми сопровождаются ОЗЗ, приводят к переходу однофазных замыканий в междуфазные, при этом отключаемые токи увеличиваются в сотни раз.

Применение дугогасящих реакторов, устанавливаемых в нейтраль сети в соответствии с [1, 2], ликвидирует дуговые однофазные замыкания, что должно приводить к снижению аварийных отключений

В этой работе проанализирован опыт применения дугогасящих реакторов в конкретной сети.

Цели и задачи исследования. Целью исследования была оценка эффективности применения ДГР в распределительных сетях 6 – 10, 35 кВ. Под эффективностью подразумевается обеспечение гашения дуги, и снижение числа аварийных отключений

Основная часть. Используя оперативные сводки инцидентов конкретных сетей, мы обрабатывали данные по аварийным отключениям на ПС (в объеме 42 месяца), разделяя сети с наличием и отсутствием ДГР.

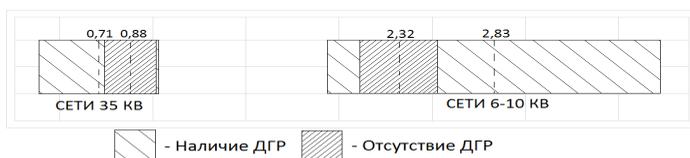
Чтобы корректно оценить эффективность применения ДГР на ПС, мы определяли среднее число отключений на один фидер сети, при этом рассчитывались дисперсия, среднеквадратическое отклонение и стандартная ошибка среднего. Примеры обработки данных показаны в табл. 1 и 2 и на рисунке.

Таблица 1. Статистика аварийных отключений

Подстанция	U, кВ					Общее число отключений	Количество фидеров на ПС	Среднее число отключений на один фидер
		2007	2008	2009	2010			
Асеево	10	7	13	26	23	69	8	8,62
Богатово	10	8	9	12	43	72	8	9
Западная	10	20	22	19	20	81	8	10,12
...
Малахово	35	0	1	1	3	5	8	0,62
Турищево	35	1	2	7	3	13	8	1,62
Итого:						2830	1456	9,65

Таблица 2. Статистические показатели

Параметр	ПС с ДГР		ПС без ДГР	
	6 – 10 кВ	35 кВ	6 – 10 кВ	35 кВ
Среднее значение	6,035	0,896	2,11	0,61
Дисперсия	2,83	0,71	2,32	0,88
Среднеквадратическое отклонение	8,008	0,504	5,382	0,774
Стандартное отклонение	0,89	0,32	0,208	0,134



Среднее число отключений с учетом ошибки среднего

Выводы. Среднее число отключений на одно присоединение при наличии и отсутствии ДГР совпадают в пределах ошибки среднего, следовательно, их можно принять идентичными.

Заключение. В обследованных электрических сетях за 4-летний период наблюдений эффективности применения ДГР не выявлено.

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 184 с.
2. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей. Госэнергонадзор Минэнерго России. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 392 с.

Д.О. Колмогоров, студ.;
рук. Ю.В. Целебровский, д.т.н., проф.
(НГТУ, г. Новосибирск)

АНАЛИЗ АВАРИЙНОСТИ СЕТЕЙ 6 – 10 – 35 – 110 КВ

Введение. В сетях с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостных токов допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения [1].

ПУЭ 1.1.17. ...Слово «допускается» означает, что данное решение применяется в виде исключения как вынужденное (вследствие стеснённых условий, ограниченных ресурсов необходимого оборудования, материалов и т.п.) [2]. Однако, реальный опыт эксплуатации показывает, что в большинстве случаев однофазные замыкания на землю в сетях напряжением 6...35 кВ не отключаются.

Цели и задачи исследования. Целью настоящей работы было относительное сравнение числа однофазных замыканий в сетях с изолированной и эффективно заземлённой нейтралью и определение целесообразности сохранения аварийного режима однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью.

Основная часть. В работе были проанализированы ежедневные оперативные сводки сибирской энергосистемы (в периоды с апреля 2007 года по декабрь 2008 год и с мая 2009 года по декабрь 2010 год – 42 месяца).

К однофазным коротким замыканиям на ВЛ в сети напряжением 110 кВ были отнесены замыкания, отключаемые защитами: дифференциально-фазная защита, токовая защита нулевой последовательности. Однофазные замыкания на землю на ВЛ напряжения 6 – 10 – 35 кВ фиксировались при срабатывании сигнализации замыкания на землю (например, ТО с «землей» или МТЗ с землей, или МТЗ «земля», АПВ или РПВ при наличии «земли»). Результаты обработки проанализированных данных приведены в таблице.

Аварийные отключения ВЛ 6...110 кВ за 42 месяца

	ВЛ 6 – 10 кВ	ВЛ 35 кВ	ВЛ 110 кВ
Общее число отключений	2538	243	275
Отключения с «Землей» и отключения защит от однофазных КЗ	195 (7,68 %)	20 (8,23 %)	179 (65,09 %)
Сигнализация «земля» без отключения	6 (0,24 %)	3 (1,23 %)	0 (0 %)
% однофазного КЗ из литературы [3]	65 %		

Выводы. На основе анализа можно сделать вывод о том, что доля неотключаемых однофазных замыканий составляет для сетей напряжением

6 – 10 кВ – 0,2 %, для сетей 35 кВ – 1 %. Это значительно меньше, чем в сети 110 кВ. Анализ характера повреждений позволяет сделать предположение о переходе однофазных замыканий в сетях 6...35 кВ в двух-трёхфазные, отключаемые релейной защитой. Малая доля неотключаемых замыканий говорит о целесообразности их отключений.

Отключение однофазных замыканий приведет к:

1. Повышению безопасности жизни людей/животных, которые могут оказаться рядом с местом аварии.

2. Исключению перехода однофазного замыкания в многофазные КЗ, а, следовательно, к уменьшению отключаемого тока.

Закключение. Однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной или заземлённой через дугогасящий реактор или резистор нейтралью, как правило, должны отключаться релейной защитой, что полностью соответствует требованиям ПУЭ

Библиографический список

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / М-во топлива и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России»: РД 34.20.501-95. – 15-е изд., перераб. и доп. – М.: СПО ОРГРЭС, 1996. – 308 с.

2. **Правила** устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 184 с.

3. **Федосеев А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

Е.С. Андреевков, асп.;
рук. А.И. Артемов, к.т.н., доц.
(Филиал ФГБОУ ВО "НИУ"МЭИ", г. Смоленск)

ОЦЕНКА КЛАССА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ

Современная измерительная аппаратура, которая является основной нагрузкой для трансформаторов напряжения (ТН), выполняется на полупроводниковой базе. По этой причине характер нагрузки ТН становится нелинейным, что приводит к появлению во вторичной цепи ТН токов высших гармоник значительного уровня, которые являются источниками дополнительной реактивной мощности. Это приводит к увеличению полной мощности нагрузки, по величине которой и осуществляется оценка класса точности ТН согласно ГОСТ 1983-2001.

Наличие высших гармоник тока во вторичных цепях ТН подтверждают в качестве примера замеры формы тока и напряжения, проведенные

на вводе цепей напряжения электронного счетчика типа Меркурий 230 AR-03 и на вводе вторичной цепи ТН типа НАМИ-6, установленного на одной из ПС 110/35/10кВ Смоленскэнерго. Результаты измерений представлены на рис. 1. Измерения производились с использованием измерительного комплекса на основе прибора Энергомонитор-3.3Т1.

Исследования влияния качества измеряемого напряжения и других факторов на погрешности ТН производились в некоторых работах [1 – 3]. Но анализ погрешностей ТН при синусоидальном первичном напряжении и несинусоидальном вторичном токе не производился. Поэтому задача оценки погрешностей ТН от несинусоидального тока во вторичной цепи является актуальной.

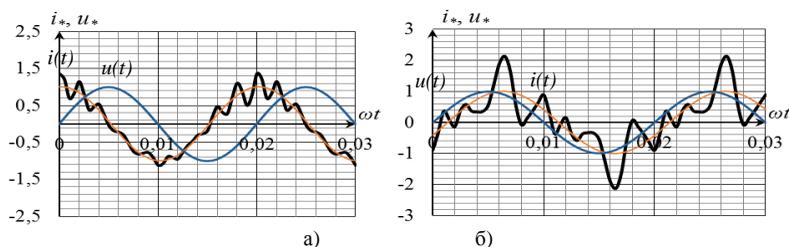


Рис. 1. а) Форма тока и напряжения на вводе счетчика типа Меркурий 230AR-03; б) форма нагрузочного тока ТН на ПС 110/35/6кВ

В ходе проведенного исследования была разработана методика расчета погрешностей ТН при нелинейной нагрузке вторичной цепи [4]. Был произведен расчет погрешностей для ТН типа НАМИ-6 при нелинейной нагрузке, создающей ток несинусоидальной формы, представленной на рис. 1, б

Согласно результатам расчетов, было установлено, что при работе ТН на нелинейную нагрузку, несмотря на то, что полная потребляемая нагрузкой мощность увеличивается за счет реактивной мощности искажения, амплитудная погрешность ТН не увеличивается и соответствует погрешности ТН от тока первой гармоники. Угловая погрешность в зависимости от уровня и фазы гармоник может значительно увеличиваться. При этом ГОСТ 1983-2001 предписывает определять погрешность ТН по величине полной мощности и $\cos\varphi$ его нагрузки. Поэтому в методику выбора и поверки ТН необходимо внести уточнения:

- Амплитудную погрешность ТН следует определять только по мощности первой гармоники тока нагрузки. Дополнительная мощность, потребляемая токами высших гармоник, незначительно влияет на величину погрешности ТН.

• Угловая погрешность ТН при наличии высших гармоник может отличаться от угловой погрешности на первой гармонике, поэтому её следует оценивать исходя из формы напряжения U_2 вторичной цепи ТН по методике, представленной в [4].

Оценка ТН по предлагаемой уточненной методике может позволить в некоторых случаях отказаться от установки дополнительных ТН на подстанциях при соответствии требованиям по угловой погрешности.

Библиографический список

1. **Савина Н.В.** Влияние качества электроэнергии на погрешность измерительных трансформаторов тока и напряжения / Н.В. Савина, М.А. Сухомесов // Электричество. – 2008. – № 11. – С. 6 – 11.

2. **Раскулов Р.Ф.** Трансформаторы напряжения 3–35 кВ. Факторы, влияющие на погрешности / Р.Ф. Раскулов // Новости электротехники. – 2011. – № 1 (67).

3. **Влияние** искажений синусоидальной формы кривых тока и напряжения на погрешности измерительных трансформаторов / Миронюк Н.Е. [и др.] // Электричество. – 2005. – № 2. – С. 31 – 36.

4. **Андреевков Е.С.** Исследование погрешностей измерительных трансформаторов напряжения при нелинейной нагрузке вторичной цепи / Е.С. Андреевков, А.И. Артемов // // Вестник КУЗГТУ. – 2015. – № 6.

Г.А. Филатова, асп.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 – 10 кВ

Введение. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ [1]. Для повышения надежности электроснабжения потребителей кабельных сетей 6 – 10 кВ городского и промышленного электроснабжения необходимо существенное сокращение затрат времени на поиск места (зоны) повреждения и его ликвидацию, что возможно только при решении задачи дистанционного определения места ОЗЗ (ОМЗЗ) на кабельной ЛЭП, находящейся под рабочим напряжением.

Параметрические способы ОМЗЗ в кабельных сетях 6 – 10 кВ. Для дистанционного определения места ОЗЗ, в том числе кратковременного или дугового перемежающегося ОЗЗ, на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, предпочтительнее использовать

токи и напряжения переходного процесса (так называемые параметрические методы ОМЗЗ).

Известные параметрические способы ОМЗЗ имеют существенные недостатки. Расчетная величина расстояния до места замыкания зависит от значения суммарной емкости сети, которая может меняться в зависимости от режима работы сети, а также от переходного сопротивления в месте повреждения [2, 3]. Ряд способов не применим при неустойчивых ОЗЗ [3].

Способ ОМЗЗ по параметрам электрических величин переходного процесса. Предложен способ, основанный на регистрации переходного напряжения на поврежденной фазе $u(t)$ на шинах контролируемого объекта, переходного тока $3i_0(t)$ поврежденной линии и скорости изменения переходного тока $d3i_0(t)/dt$. По полученным осциллограммам фиксируют моменты переходов тока $3i_0(t)$ через нулевое значение, где k – порядковый номер перехода тока через нулевое значение, определяют и фиксируют соответствующие моментам времени t_{0k} мгновенные значения напряжения на поврежденной фазе $u(t_{0k})$, скорости изменения тока $d3i_0(t_{0k})/dt$, по зафиксированным значениям $u(t_{0k})$ и $d3i_0(t_{0k})/dt$ и по известной погонной индуктивности для поврежденной линии $L_{\Pi} = (2L_{\Pi\Pi} + L_{0\Pi})/3$, где $L_{\Pi\Pi} = L_{2\Pi}$ – погонная индуктивность линии прямой (обратной) последовательности, $L_{0\Pi}$ – погонная индуктивность линии нулевой последовательности, определяют расстояние l_3 до места ОЗЗ в соответствии с выражением

При наличии нескольких переходов тока $3i_0(t)$ через нулевое значение ($k > 1$) искомое расстояние до места ОЗЗ может быть определено как среднее из нескольких значений l_{3k} , определенных по выражению (1).

$$l_{3k} = \frac{u(t_{0k})}{(d3i_0(t_{0k})/dt) \cdot L_{\Pi}}. \quad (1)$$

При пробое изоляции поврежденной фазы сети на землю возникает переходный процесс, связанный с разрядом емкостей поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз. Разрядная и зарядная составляющие переходного напряжения на поврежденной фазе $u(t)$ и переходного тока $3i_0(t)$ имеют, как правило, колебательный характер (рис. 1).

Исследования на имитационных моделях показали, что данный способ определения места ОЗЗ в распределительных сетях 6 – 35 кВ не содержит зависимости от суммарного емкостного тока сети, переходного сопротивления в месте повреждения, режима заземления нейтрали (рис. 1). Данный способ позволяет определять место любого ОЗЗ (в том числе, самоустраняющегося и дугового перемежающегося).

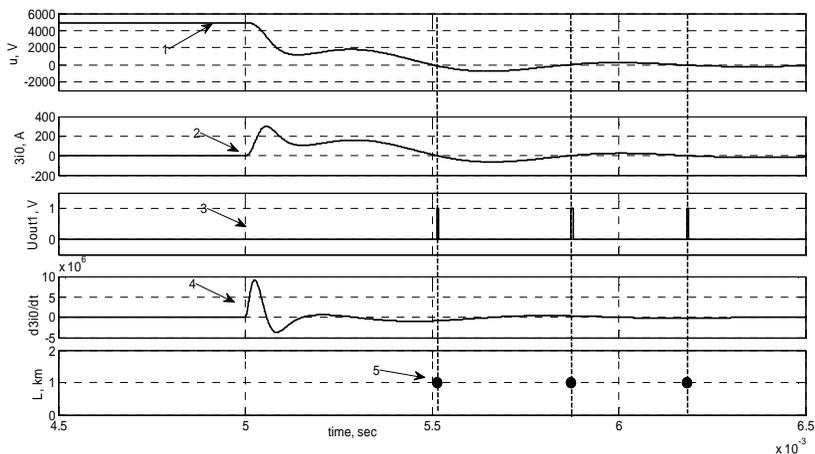


Рис. 1. Осциллограммы электрических величин переходного процесса и расчетное значение расстояния до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 10$ А, $R_n = 10$ Ом и $l_3 = 1$ км: 1 – переходное напряжение на поврежденной фазе; 2 – переходный ток нулевой последовательности поврежденной линии; 3 – моменты перехода тока $3I_0(t)$ через нулевое значение; 4 – производная тока нулевой последовательности; 5 – значения расстояния до места ОЗЗ, рассчитанные по (1)

Библиографический список

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
2. Патент РФ № 2222026 G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания в распределительных сетях // Качесов В.Е. – Опубл. 11.01.2002.
3. Байбурич Э.Р. Метод оперативного определения места повреждения электрической сети напряжением 6 (10) – 35 кВ // Нефтегазовое дело, 2006. Электронный научный журнал. [http://www.ogbus.ru/authors/Bayburin/Bayburin1 .pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Bayburin/Bayburin1.pdf).

Е.В. Нечаев, маг.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПИТАНИЯ, УСТАНОВЛЕННОГО НА ПЕРВИЧНОМ ПРОВОДЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В связи с развитием инновационной концепции «Интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивной сетью» активно

ведется внедрение цифровых подстанций в существующие электрические сети. Источниками информации о токах и напряжениях на цифровых подстанциях являются цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения. Основными элементами таких трансформаторов являются первичный преобразователь напряжения и электронные блоки различного назначения (блок преобразования сигнала в цифровой код, блок управления цифровым измерительным трансформатором, блок передачи информации), в связи с чем появилась потребность в организации питания для микропроцессорной аппаратуры цифровых измерительных трансформаторов.

Питание электроники можно осуществить с помощью традиционного трансформатора напряжения, однако более интересным и экономически эффективным решением является отбор мощности с фазного провода высоковольтного оборудования.

Электронный блок питания должен отвечать следующим требованиям:

1. Работа в широком диапазоне токов (отсутствие влияния токов короткого замыкания на электронику; питание электроники при отсутствии тока в линиях электропередачи).

2. Устойчивость к изменениям климатических и температурных условий в соответствии с ГОСТ 15150-69 (умеренный климат).

3. Механическая стойкость класса М1 и М2 в соответствии с ГОСТ 17516.1-90, а также степень защиты IP-X6 в соответствии с ГОСТ 14254-96.

4. Устойчивость к волновым процессам, учет индивидуальных особенностей и геометрии проводов линии электропередачи.

Рассматриваемый в данной работе электронный блок питания состоит из следующих элементов:

1. Трансформатор питания с первичной и вторичной обмотками с размыкаемой конструкцией, позволяющей использовать устройство на любой удаленности от подстанции и в любом месте линии электропередачи.

2. Система резервирования питания, которая состоит из аккумуляторных батарей и ионистора. Такая система позволяет использовать электронный блок, даже когда отбор мощности с первичного провода невозможен (при выводе линии в ремонт, во время бестоковой паузы).

3. Система защиты и стабилизации напряжения. В случаях, когда в схеме протекает ток сверхдопустимых значений, система защиты отключает электронику от трансформатора питания.

Данный принцип реализован в устройстве релейной защиты мертвой зоны, выполненной по заказу ОАО «СО ЕЭС» на базе МЭИ и ИГЭУ. Устройство проходит опытную эксплуатацию на Нижегородской подстанции.

Дальнейшей целью исследований является создание программного алгоритма расчета геометрических и физических параметров электронного блока питания под индивидуальные параметры любой электрической сети. Также планируется создание экспериментальных образцов и их исследование.

А.Н. Борисова, студ.;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доц.,
В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Дифференциальная защита на микропроцессорной (цифровой) элементной базе обладает более расширенными и качественными защитными функциями по сравнению с электромеханической и микроэлектронной защитой. Вместе с тем возросла сложность проектирования, наладки и эксплуатации новых устройств защиты, поскольку микропроцессорные устройства обладают рядом существенных особенностей по сравнению с устройствами предыдущих поколений. Это связано с тем, что микропроцессорная защита имеет совершенно другую структуру построения, где не существует физических блоков, соответствующих отдельным защитным функциям. Работа устройства защиты определяется математическими алгоритмами функционирования блоков. Это позволяет более точно адаптировать характеристики защиты к процессам, возникающим в электроэнергетическом объекте при его повреждении. В цифровых устройствах существенно увеличивается число параметров, устанавливаемых пользователем, в зависимости от особенностей использования устройства на определенном защищаемом объекте электроэнергетической сети.

Таким образом, эффективность микропроцессорной релейной защиты зависит от правильного использования ее функций при проектировании и грамотной эксплуатации.

Для анализа функционирования дифференциальной защиты в различных режимах в системе Matlab выполнены модель силового трехобмоточного трансформатора с учетом насыщения стали сердечника и модель трансформатора, позволяющая учитывать повреждения внутри трансформатора [1].

При исследовании процессов в защищаемом объекте уделялось внимание особенностям трансформатора, приводящим к увеличению тока небаланса в дифференциальной защите, таким как наличие сдвига по фа-

зе между токами сторон силового трансформатора, неравенство вторичных токов трансформаторов тока (ТТ) сторон, регулирование коэффициента трансформации трансформатора, приводящее к нарушению выравнивания вторичных токов ТТ защиты. Кроме того учитывался режим включения ненагруженного трансформатора под напряжение, когда со стороны, с которой подается питание на трансформатор, протекает ток намагничивания трансформатора, который воспринимается защитой как дифференциальный ток, режим заземления нейтрали трансформатора.

Микропроцессорные устройства релейной защиты трансформаторов выпускаются различными фирмами-изготовителями, как отечественными, так и зарубежными. Как правило, все защиты выполняются с торможением. Функция дифференциальной защиты в этих устройствах имеет разные характеристики срабатывания, а также различное формирование дифференциального и тормозного токов [2,3].

В результате расчета моделей трансформаторов были построены векторные диаграммы токов сторон силового трансформатора, дифференциального и тормозного токов на разных принципах их формирования в различных режимах:

- междуфазные внутренние и внешние короткие замыкания (КЗ) на сторонах трансформатора: металлические и через переходное сопротивление, при наличии одностороннего и многостороннего питания, с учетом и без учета нагрузки, для различных групп соединения обмоток силового трансформатора;

- внешние и внутренние КЗ на землю со стороны заземленной нейтрали, металлические и через переходное сопротивление;

- замыкания между витками обмоток трансформатора.

Также был проведен гармонический анализ дифференциального тока при включении ненагруженного трансформатора под напряжение при наличии и отсутствии остаточной индукции в сердечнике.

На основе полученных в результате анализа электрических величин защищаемого силового трансформатора будут разработаны модели дифференциальной защиты с различными принципами формирования дифференциального и тормозного токов, различных характеристик срабатывания, а также с учетом всех погрешностей измерительных трансформаторов тока, способов амплитудного и фазового выравнивания вторичных токов сторон силового трансформатора и способов предотвращения ложной работы дифференциальной защиты при бросках тока намагничивания.

Библиографический список

1. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 288 с.

2. **Методические** указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) трансформаторов с высшим напряжением 110-220 кВ – СТО 56947007-29.120.70.137-2012. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.

3. **Методические** указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА». – СТО 5694007-29.120.70.99-2011. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.

Д.М. Комлев, студ.;
рук. С.О. Алексинский, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ГИБРИДНЫЙ АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВЫЗВАННЫХ НАСЫЩЕНИЕМ МАГНИТОПРОВОДА

В мировой энергетике в настоящее время развиваются и внедряются концепции «SmartGrid» и «Цифровая подстанция». Это обусловлено необходимостью усиления централизации функций управления в электроэнергетике. Технической основой для современных систем управления являются микропроцессорные, компьютерные и сетевые информационные технологии. В тоже время, для обеспечения надежности информационно-технических систем в электроэнергетике целесообразно сохранять традиционные электромеханические локальные системы релейной защиты и автоматики. Это обуславливает необходимость использования традиционных электромагнитных трансформаторов тока и напряжения.

Существенным недостатком электромагнитного трансформатора тока является насыщение магнитопровода при сверхтоках короткого замыкания. Микропроцессорная реализация цифрового канала ввода информации о параметре тока позволяет алгоритмическим путем существенно уменьшить погрешности измерения. Для этого аналоговый сигнал должен быть преобразован в цифровую форму. В соответствии со стандартом МЭК 61850-9-2LE, который выставляет требования к частоте дискретизации измеряемых сигналов: 4000 Гц (80 отсчетов за период) для целей релейной защиты и коммерческого учёта и 12800 Гц (256 отсчетов за период) для целей контроля качества электроэнергии. В тоже время для рассматриваемой задачи коррекции характеристики преобразования трансформатора тока требуется обработка сигналов (частотная фильтрация) на коротком интервале времени до 2-3 мс. Для эффективного выполнения указанной функции целесообразно взять максимально возможную частоту отсчетов, которую допускают технические средства с при-

емлемыми для задачи технико-экономическими характеристиками. Современные микроконтроллеры имеют встроенные АЦП поразрядного уравнивания со временем преобразования порядка 1 мкс. С учетом ограниченности вычислительных ресурсов микроконтроллера можно ограничить выбираемую частоту дискретизации величиной 51200 Гц. Выбор конкретного значения частоты дискретизации производится исходя из оценки производительности процессора, объема ОЗУ и размера программы.

Целью настоящей работы является компенсация погрешностей, вызванных насыщением магнитопровода трансформатора тока. Общий алгоритм предусматривает:

1) реализацию цифрового частотного фильтра выделяющего на коротком интервале наблюдения 0-3 мс первую гармонику сигнала;

2) реализацию алгоритма вычисления амплитуды и фазы; с этой целью предусматривается применение алгоритма Манна и Моррисона.

В качестве технических средств рассмотрена возможность использования микроконтроллеров с различными техническими характеристиками таких фирм производителей, как: C8051F064 (SiliconLaboratories), ArduinoMega 2560 и PIC 12.

В ходе оценки необходимых для решения поставленной задачи программно-аппаратных ресурсов производится моделирование функционирования аналогово-цифрового трансформатора тока. Моделирование производится в программной среде MATLAB с использованием пакета Simulink на основе принципов визуального программирования.

Д. И. Аземша, студ.;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЦЕЛЯХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Расчет электрических величин при коротких замыканиях является самым трудоемким и ответственным этапом проектирования релейной защиты. Для бездефектного проектирования процесс расчета токов короткого замыкания (КЗ) выполняется с помощью специальных программ. Наиболее эффективными являются объектно-ориентированные программы, в которых учитываются особенности расчета электрических

величин для релейной защиты. Графический интерфейс программы расчета токов КЗ для проектирования релейной защиты должен использовать графические образы и термины, привычные для инженеров-электроэнергетиков, предлагать наглядность заданной расчетной схемы, удобство задания узлов КЗ и расчетных режимов, обеспечивать вывод результатов расчета и предоставление протоколов расчета электрических величин при КЗ.

Специфические требования к расчету электрических величин при КЗ в целях релейной защиты должны учитывать возможность определения значений токов и напряжений, подводимых к измерительным органам защиты, направление мощности при КЗ через защиту, возможность расчета большого числа специальных режимов в электрической сети при коротких замыканиях в различных узлах, возможность учета сложных случаев взаимоиндукции между параллельными ветвями и сложных случаев несимметрии.

Разработанный графический интерфейс обеспечивает:

- создание электрической схемы сети в графических образах и терминах, используемых в практике инженеров-электроэнергетиков с применением набора базисных элементов, с возможностью их редактирования и создания новых элементов на основе существующих;

- задание параметров элементов для формирования математических моделей согласно данным из электротехнических справочников;

- редактирование схемы: перемещение элементов электрической сети, копирование и удаление элементов, копирование свойств элементов (при наличии нескольких одинаковых элементов в сети), изменение соединений элементов, удаление соединений элементов;

- задание параметров расчетного режима: режимов работы электроэнергетических систем, задание места и вида КЗ на схеме в графическом режиме, задание состояния выключателей на схеме в графическом режиме, выбор текущего режима работы для каждого элемента в диалоговом режиме (изменения вносятся в таблице в дополнительном окне) и графическом режиме (изменения вносятся в основном окне программы на схеме);

- вывод результатов расчета на расчетной схеме графического редактора;

- экспорт исходных данных, схемы сети и результатов расчёта для печати: схемы сети в системе AutoCAD, исходных данных и результатов расчета в MS Excel или MS Word.

Схема расчетной электрической сети задается в виде однолинейной электрической схемы (рис. 1), составленной из набора элементов. Базис-

ный набор элементов, используемый для создания электрических схем включает: системы с изолированной и глухозаземленной нейтралью, генератор, двухобмоточные и трехобмоточные трансформаторы с различными схемами соединения обмоток, одинарный и двоянный реакторы, воздушную и кабельную линии, сборные шины, шинопровод, выключатели, синхронный и асинхронный двигатели, узел «комплексная нагрузка», узел «междуфазное КЗ», узел «КЗ на землю».

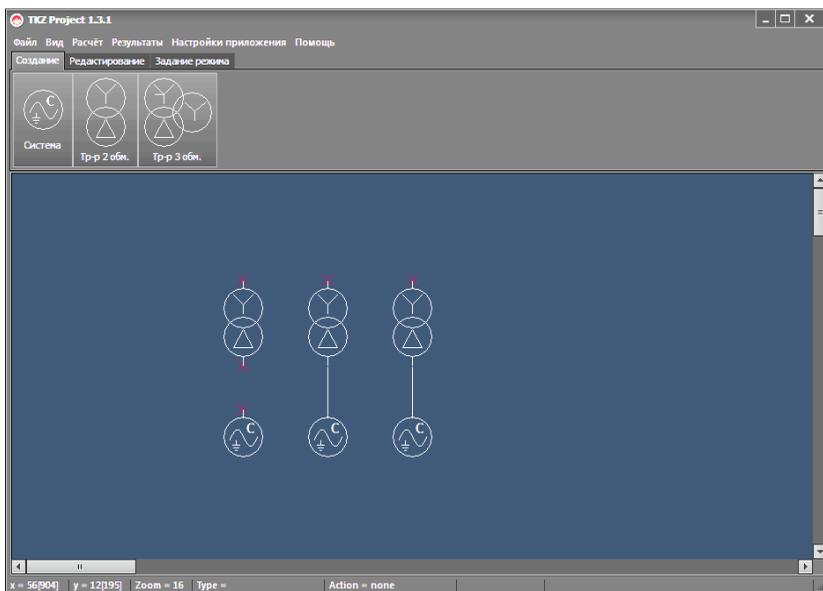


Рис. 1. Вид графического интерфейса

Программа расчета электрических величин при КЗ будет выполнена с использованием разработанных моделей и алгоритмов для расчетов в фазных составляющих установившихся электромагнитных процессов в электроэнергетических системах при коротких замыканиях и сложных несимметриях [1].

Библиографический список

1. **Математические** модели и алгоритмы для расчетов в фазных составляющих установившихся электромагнитных процессов в электроэнергетических системах при коротких замыканиях и сложных несимметриях / О.В. Фролова, В.А. Шунин, А.Ю. Мурзин, А.В. Насонов // Вестник ИГЭУ. – Вып. 5. – Иваново, 2004. – С. 40 – 52.

*Т.Ю. Шадрикова, асп.,
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
О.А. Добрягина, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НА ОСНОВЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В КОМПЕНСИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 – 10 кВ

Введение. В настоящее время для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) распределительных кабельных сетей 6 – 10 кВ с резистивно заземленной нейтралью наиболее широкое применение получили устройства максимальных защит, основанных на контроле высших гармоник (ВГ) тока нулевой последовательности защищаемого присоединения. Однако указанные устройства защиты от ОЗЗ обладают низкой эффективностью функционирования (селективностью и чувствительностью), прежде всего, при дуговых ОЗЗ, тогда как до 80 – 90 % всех замыканий на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ в начальной стадии развития пробоя изоляции имеют дуговой прерывистый характер. Наиболее опасной разновидностью ОЗЗ являются дуговые перемежающиеся замыкания на землю (ДПОЗЗ), сопровождающиеся значительными перенапряжениями на неповрежденных фазах во всей электрически связанной сети и увеличением эффективного значения тока в месте повреждения. Перенапряжения при ДПОЗЗ могут привести к переходам ОЗЗ в двойные и многоместные замыкания на землю или междуфазные КЗ, снижая тем самым надежность электроснабжения потребителей. Поэтому при ДПОЗЗ защита должна действовать на отключение поврежденного присоединения.

Для достижения главной цели релейной защиты – повышения надежности электроснабжения потребителей, прежде всего, при наиболее опасных ДПОЗЗ, необходима разработка защиты, обладающей способностью распознавать опасные для сети ДПОЗЗ и в зависимости от степени опасности выбирать наиболее эффективный способ действия (на сигнал или на отключение).

О способах распознавания опасных дуговых перемежающихся замыканий на землю. Опасными считаются перенапряжения, кратность которых превышает значение $K_n \geq 2,4-2,5$ [1, 2]. На объектах кабельных сетей 6 – 10 кВ – распределительных и трансформаторных подстанциях, на которых устанавливаются максимальные токовые защиты, не требующие цепей напряжения, как правило, отсутствуют фазные трансформаторы напряжения, поэтому прямой способ контроля величины перенапряжений при ДПОЗЗ не применим.

Как показано в работах [1, 2 и др.] и подтверждено исследованиями на имитационных моделях кабельных сетей 6 – 10 кВ [3], кратность перенапряжений K_n зависит от величины интервалов времени между повторными пробоями изоляции фазы сети на землю Δt (рис. 1).

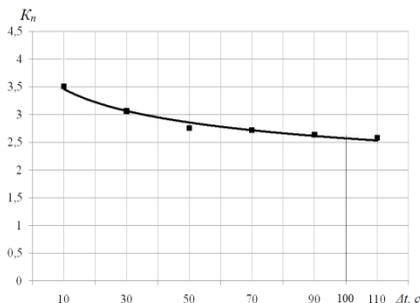


Рис. 1. Зависимость кратности максимальных перенапряжений K_n при дуговом ОЗЗ от интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги Δt

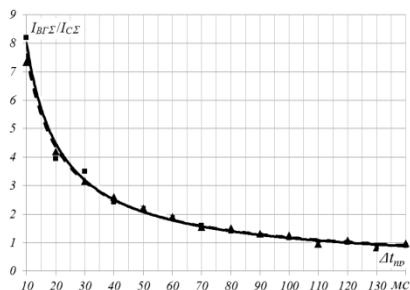


Рис. 2. Зависимость относительного значения общего уровня ВГ в токе ОЗЗ $I_{\text{ВГ}\Sigma}/I_{\text{С}\Sigma}$ от интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги при ДПОЗЗ в кабельных сетях 6 – 10 кВ

Из рис. 1 можно видеть, что опасные ДПОЗЗ возникают при интервалах времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t \leq 100$ мс. При этом из зависимости относительного значения уровня ВГ в токе ОЗЗ $I_{\text{ВГ}\Sigma}/I_{\text{С}\Sigma}$ от интервалов времени между повторными пробоями изоляции Δt (рис. 2) получаем, что при ДПОЗЗ ($\Delta t \leq 100$ мс) относительный уровень высших гармоник в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения составляет $I_{\text{ВГ}\Sigma}^* \leq 1$. Полученная зависимость позволяет выбрать ток срабатывания максимальной токовой защиты на основе ВГ, обеспечивающий ее срабатывания при внутренних ДПОЗЗ.

Вывод. Получен косвенный критерий распознавания ДПОЗЗ, позволяющий повысить эффективность функционирования существующей максимальной токовой защиты на основе высших гармоник от устойчивых ОЗЗ, дополнив ее ступенью, действующей при ДПОЗЗ.

Библиографический список

1. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Халилов, Ф.Х. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.: под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 268 с.

3. **Винокурова, Т.Ю.** Высшие гармонические составляющие в переходных токах замыкания на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // Десятая международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: материалы конференции. В 7 т. Т.3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2015. – С. 110 – 112.

И.Н. Румянцев, студ.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.,
А.В. Куванов, асс.,
(ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНЫХ КУРСОВ И ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ И АВТОМАТИКЕ

Для изучения курсов «Релейная защита и автоматика» весомую роль играют практические занятия. В связи с высоким развитием вычислительной техники весьма эффективно практикум может выполняться и выполняется с применением программно-компьютерного обеспечения. Однако, значимую роль в освоении курсов играет и физический эксперимент, который важен не только для образования, но и для проведения научных исследований.

В настоящее время существует богатый выбор оборудования для учебно-научного эксперимента по релейной защите и автоматике. Безусловно, лидерами в этом являются программно-аппаратные комплексы реального времени, такие как RTDS (Real Time Digital Power System Simulator), либо оборудование для системы Opal RT. Однако, это дорогое оборудование, что ограничивает его широкое внедрение в учебно-исследовательскую практику.

В ИГЭУ, на кафедре автоматического управления электроэнергетическими системами, внедрены в учебный процесс стенды, выпущенные компанией «Учебная техника» (г. Челябинск). На данных стендах физическая реализация первичного электросетевого оборудования выполнена в трехфазном исполнении, а функции управления и защиты реализованы на программно-инструментальном уровне с помощью плат ввода-вывода фирмы National Instruments, интегрированных в компьютеры.

Для полноценного изучения работы современных устройств РЗА авторами было решено расширить функциональные возможности стендов, интегрировав в них терминалы современных микропроцессорных защит.

Однако, уровни первичных и вторичных токов и напряжений стенда не подходят для прямого подключения микропроцессорных терминалов

РЗА. Так, уровни номинальных токов $0,01 \div 0,1$ А, а фазные напряжения – 220 В, в то время как номинальные токи терминалов 1 (5) А, а напряжений 100 В ($100/\sqrt{3}$ В). Для согласования указанного оборудования по токам и напряжениям было решено оборудовать стенды дополнительными согласующими трансформаторами тока и напряжения. Авторами выполнено исследование влияния промежуточных измерительных трансформаторов как на изменение параметров моделируемых первичных цепей, так и искажения измеряемых токов и напряжений.

*Е.А. Воробьева, асп.,
О.А. Добрягина, к.т.н., доц.,
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В α -, β -, 0-СОСТАВЛЯЮЩИХ

В настоящее время практическое применение для решения задач, связанных с исследованиями переходных процессов при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в сетях 6 – 10 кВ, с использованием аналитических методов получили три основных подхода:

- 1) аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в фазных координатах a , b , c ;
- 2) аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в симметричных координатах прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- 3) аналитическое решение в α -, β -, 0-координатах.

Первый подход, как правило, применяется для решения задач, когда требуется определить фазные напряжения и напряжение в нейтрали сети, второй подход – для определения только составляющих нулевой последовательности. При оценке параметров и соотношений переходных токов и напряжений, используемых для действия защит от ОЗЗ, реагирующих на переходный процесс, в общем случае необходимы как фазные, так и симметричные составляющие нулевой последовательности. Для этого подхода наиболее удобным является применение α -, β -, 0-составляющих.

Известно аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ для двухчастотной схемы замещения, полученное с использованием метода симметричных составляющих [1, 2], которое позволяет по-

лучить только ток и напряжение нулевой последовательности, тогда как для некоторых задач необходимо знать и их фазные составляющие.

Из схемы замещения рис. 1, можно получить уравнения для составляющих нулевой последовательности напряжения на шинах и тока в месте повреждения в дополнительном режиме в операторной форме, частоты и постоянные затухания свободных разрядных и зарядных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности определяются из приближенного решения характеристического уравнения.

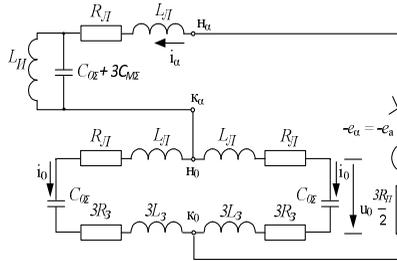


Рис. 1. Упрощенная схема замещения сети 6 – 10 кВ в α , β , 0-составляющих для расчета свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ на фазе a

Зная корни характеристического уравнения с использованием теоремы разложения Хэвисайда при нулевых начальных условиях, для напряжения нулевой последовательности могут быть получены оригиналы функции $u_0(p)$.

Сравнение уравнений для напряжения нулевой последовательности $u_N(t) = u_0(t)$, полученным для схемы замещения с использованием α -, β -, 0-составляющих, с уравнением для $u_N(t) = u_0(t)$, полученным по методу симметричных составляющих для той же схемы замещения, показывает их идентичность, что является подтверждением достоверности аналитического решения, полученного в α -, β -, 0-составляющих

Ток нулевой последовательности в месте ОЗЗ определяется дифференцированием уравнения $u_0(t)$.

Аналогичным образом получены решения для составляющих нулевой последовательности тока и напряжения при ненулевых начальных условиях ($u_N(p) \neq 0$) и для α -составляющих напряжения и тока.

Таким образом, для двухчастотной схемы замещения сети 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью получено аналитическое решение для переходного тока и напряжения нулевой последовательности в α -, β -, 0-составляющих, имеющее более широкую область применения, чем аналогичное решение в симметричных составляющих.

Библиографический список

1. **Шуин В.А.** Теория и практическая реализация защит от замыканий на землю, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, для электрических сетей 6 – 35 кВ // Дис. ... докт. техн. наук. – Москва: ВНИИЭ. – 1994.

2. **Шуин В.А.** Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3 – 10 кВ // Электричество. – 1983, № 12. – С. 4 – 9.

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

РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время активно развиваются направления по созданию нетрадиционных измерительных преобразователей тока и напряжения для высоковольтной энергетики. На кафедре АУЭС ИГЭУ осуществляется разработка цифровых трансформаторов напряжения. Наиболее перспективным, по мнению авторов является создание высоковольтного делителя напряжения, обладающего рядом положительных свойств по сравнению с традиционными высоковольтными трансформаторами напряжения. Однако предлагаемый преобразователь напряжения на основе делителя обладает и недостатками, одним из них является высокое выходное сопротивление (рис. 1). При подключении к выходу делителя согласованного усилителя и АЦП это не является большой проблемой. Однако в процессе создания и анализа характеристик разрабатываемых делителей возникает трудность их исследования по причине отсутствия специализированных приборов.

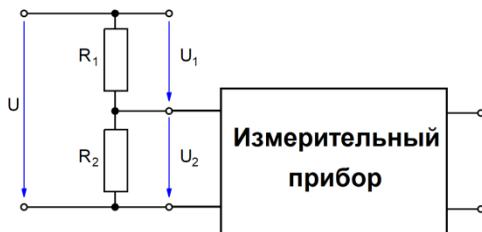


Рис. 1. Пример простейшего делителя напряжения с подключенным к нему измерительным прибором

В связи с этим была поставлена задача: разработать усилитель с высоким входным сопротивлением и низким выходным, достаточным, для подключения стандартных измерительных приборов.

В ходе выполнения исследований был проведен анализ уже существующих схем [1, с. 69], [2] и др. Для анализа была использована программная среда Multisim. В результате анализа ряда схем анализируемых литературных источников были выявлены их недостатки. В ряде случаев исследуемые схемы работали нестабильно, так как в процессе моделирования в них наблюдались возбуждения, которые негативно влияли на амплитуду и фазу электрического сигнала. В результате исследований была выбрана схема, упрощенный вариант которой представлен на (рис. 2). Авторами в нее были внесены изменения, позволившие повысить стабильность работы и точность преобразования сигнала. Также с использованием программы анализа электрических и электронных схем Multisim выполнены исследования ее характеристик таких как АЧХ и ФЧХ, а также влияния изменений входных и выходных сопротивлений.

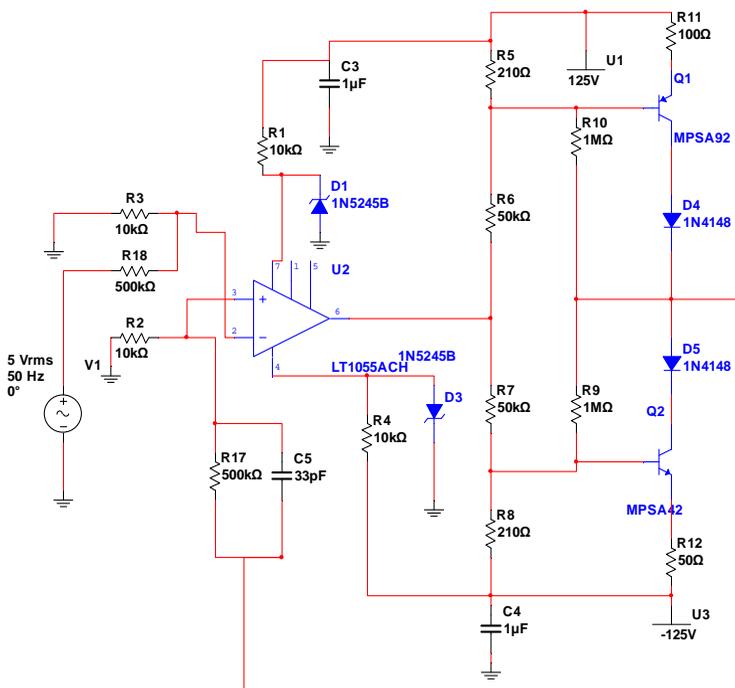


Рис. 2. Схема высоковольтного усилителя напряжения, моделируемая в программе Multisim

Библиографический список

1. **Горшков Б.И.** Элементы радиоэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
2. **Linear** technology electrical circuits [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://circuits.linear.com/439>.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Измерительные органы устройств, в которых при обработке информации выполняются операции с последовательностями чисел, зависящими от текущих значений входных напряжений, являются цифровыми (ЦИО). Для оценки поведения ЦИО в реальных режимах работы электрической системы необходимы исследования методов реализации их характеристик, влияния частоты дискретизации входных сигналов на характеристики ЦИО, частотных характеристик ЦИО, поведения их в динамических условиях и т.д.

Основные операции в ЦИО производятся не с аналоговыми сигналами, а с чередующимися во времени с периодом T_d последовательностями двоичных чисел, соответствующими дискретным сигналам, полученным при цифровой обработке входных аналоговых сигналов.

Алгоритмом ЦИО называется последовательность операций с цифровыми отсчётами (выборками), зависящими от входных аналоговых сигналов, обеспечивающая измерение контролируемых параметров электрической системы или оценку их нахождения в заданной области. В работе были изучены простейшие алгоритмы цифровой обработки информации.

В основу рассматриваемых алгоритмов положена возможность определения амплитуды U_m и фазы ψ входного синусоидального сигнала, имеющего вид $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$, изменяющегося с частотой $\omega = \omega_1$, по известным в произвольный момент времени t мгновенным значениям сигнала $u(t)$ и его первой и второй производных.

В ходе работы были проанализированы следующие алгоритмы:

- Алгоритм двух последних выборок;

- Алгоритм двух последних выборок с усреднения замера мгновенного значения на отрезке T_d ;

- Алгоритм трех последних выборок;

- Алгоритм двух выборок, взятых через m отсчетов.

Изучение свойств алгоритмов производилось путем создания экспериментальной модели, включающей в себя источник аналогового сигнала, АЦП и ЦИО, в среде Simulink программного пакета MATLAB.

Для каждого из указанных алгоритмов была рассмотрена зависимость амплитудной и фазовой погрешности от числа отсчетов за период, построены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики, а также определена задержка первого срабатывания.

Собственное время расчета алгоритмов сравнивалось при помощи специальной функции MATLAB, определяющей реальное время расчета модели Simulink. Надо заметить, что эта функция сама по себе значительно влияет на скорость расчетов, поэтому она не дает информации о реальном времени расчета алгоритмов, но зато позволяет сравнить их относительно друг друга.

Сравнение алгоритмов показало, что все они обладают примерно одинаковым быстродействием, а наиболее точная обработка сигнала осуществляется алгоритмом двух выборок, взятых через m отсчетов. Было решено применить данный алгоритм для решения некоторых практических задач, а именно:

- сравнение синусоидальных величин по фазе, используемому в электронных реле с двумя и более основными воздействующими величинами;

- вычисление комплексной величины $Z(nT_d)$ с последующим сравнением этой величины с заданной областью значений в плоскости Z ;

- вычисления симметричных составляющих отдельных последовательностей по текущим выборкам мгновенных значений напряжений и токов трёхфазной системы;

- определение места повреждения на ЛЭП методом двустороннего замера.

Решение всех перечисленных задач успешно реализовано в среде Simulink с применением выбранного алгоритма.

Материалы исследований рекомендуются к включению в состав дисциплины «Основы цифровой релейной защиты», изучаемой студентами кафедры АУЭС на 4 курсе.

Библиографический список

1. **Никитин А.А.** Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014.

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ
ПЕРВИЧНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ИЗМЕРЕНИЙ**

В настоящее время активно ведутся разработки по созданию нетрадиционных измерительных преобразователей тока и напряжения. Исследования показывают, что достаточно перспективным является применение маломощных делителей напряжения. Причиной этого служит то, что с применением микропроцессорной элементной базы в обработке и передаче информации отпала необходимость производить мощные измерительные преобразователи. Однако такие конструкции могут быть подвержены влиянию внешних и внутренних электромагнитных воздействий, что снижает точность измерений и влияет на частотные свойства самого преобразователя.

Исследование частотных характеристик выполнялось для низкочастотного резистивного делителя напряжения кл. 110 кВ. При создании делителя необходимо решать несколько задач: определить число резисторов, величины их сопротивлений, а также их расположение, что влияет на распределение электрического поля в конструкции.

При исследовании макетного образца резистивного делителя, установленного в теле изолятора, снимать показания вручную неудобно. Поэтому необходимо организовать автоматический опрос и с помощью осциллографа и программного комплекса записывать в файл показания прибора.

Для проведения эксперимента была собрана схема, состоящая из резистивных делителей, осциллографа, OMICRON 356, представленная на рис. 1.

В собранной схеме OMICRON 356 служит источником питания. Испытательное напряжение, изменяемое в заданном частотном диапазоне, формировалось с помощью комплекса OMICRON СМС 356 и повышалось с помощью дополнительного трансформатора.

С помощью осциллографа, предназначенного для исследования (наблюдения, записи, измерения) амплитудных и временных параметров электрического сигнала, подаваемого на его вход, либо непосредственно на экране, снимали амплитудно-частотные и фазо-частотные характери-

стики. Записанные сигналы обрабатывались с помощью специально-разработанной программы в программном комплексе Matlab.

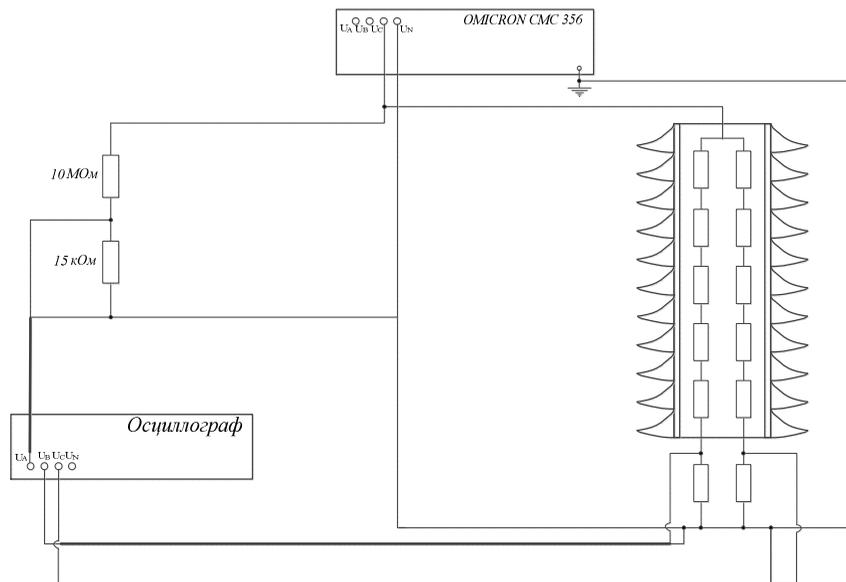


Рис. 1. Исследуемая схема

Таким образом, входе экспериментальных исследований были построены частотные зависимости, выявлены закономерности при вариации параметров измерительных преобразователей на основе резистивных делителей напряжения, построены имитационные модели резистивных делителей и упрощенные схемы замещения, отражающие доминирующие явления, а так же рассмотрены методы компенсации частотных погрешностей.

Полученные закономерности поведения измерительных преобразователей напряжения на основе резистивных делителей в частотной области позволили разработать методы компенсации их погрешностей. После выполненных мероприятий по компенсации погрешностей и частотных зависимостей исследуемые измерительные преобразователи могут быть использованы для измерения напряжений в электроэнергетических системах. Значения напряжений, измеренные с помощью разработанных первичных преобразователей с компенсированными частотными характеристиками, могут быть использованы в алгоритмах релейной защиты работающих на высших гармониках.

П.В. Лылов, студ.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.,
А.А. Фомичев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ОЦИФРОВАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИИ

В настоящее время в электроэнергетике реализуются пилотные проекты, направленные на создание автоматизированных подстанций с организацией передачи информации с помощью современных быстродействующих каналов связи, такие подстанции получили названия цифровых.

Передача измеренных значений токов и напряжений от первичных преобразователей к устройствам релейной защиты и автоматики, а также приборам учета электроэнергии на цифровой подстанции осуществляется по оптическим каналам в цифровом виде по специализированному протоколу МЭК 61850-9-2LE.

В работе [1] была представлена разработка, направленная на реализацию обработки и передачи сигналов по протоколу МЭК 61850-9-2LE. В основе данного преобразователя был использован многофункциональный одноплатный компьютер RaspberryB+, который сопрягался с АЦП через интерфейс SPI. При выборе данного аппаратного средства автор руководствовался низкой стоимостью, возможностью программирования данного устройства с помощью языков высокого уровня. На начальном этапе токи и напряжения эмулировались в программном коде в соответствии с протоколом, однако при анализе цифровых потоков были обнаружены существенные задержки, которые не позволяют использовать данное решение в электроэнергетике.

В связи с недопустимыми инструментальными задержками, обнаруженными при работе RaspberryB+, было решено перейти на использование 32-битного ARM-микроконтроллера STM32F407VGT6. Исследования выполнялись на отладочной плате STM32F4DISCOVERY.

В результате проделанной работы разработан программный код для «прошивки» отладочной платы STM32F4DISCOVERY, выполняющий следующие функции:

- оцифровка данных с частотой 4000 Гц и 12800 Гц, согласно стандарта МЭК-61850-9-2LE;
- формирование SV пакета для 80 и 256 выборок за период, согласно МЭК-61850-9-2LE;
- отправка сформированного пакета в сеть Ethernet.

Для контроля целостности и визуализации потока данных, формируемого платой STM32F4DISCOVERY, была разработана программа для ПК, обладающая следующими функциями:

- поиск/отображение/выбор сетевого интерфейса;
- поиск потоков, сформированных согласно МЭК-61850-9-2LE;
- визуализация принятых данных согласно МЭК-61850-9-2LE;

Дальнейшую работу планируется направить на организацию временной синхронизации выборок МЭК-61850-9-2LE используя протоколы PTPv2 и 1PPS.

Для анализа потоков метрологической информации использовалось следующее оборудование: OMICRON356 и PЕТОМ-61850.

Библиографический список

1. **Лылов, П.В.** Цифровая передача мгновенных значений токов и напряжений / П.В. Лылов, А.А. Фомичев // Электроэнергетика: десятая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: «Энергия-2015»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – С. 126 – 127.
2. **IEC 61850-9-2 Process Bus Communication Interface for Light Weight Merging Unit Testing Environment** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:559563/fulltext02>.

А.Ю. Меркулов, студ.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
А.А. Яблоков, асс.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА НА ПЛАТЕ DK55 С МИКРОСХЕМОЙ SC24-IEC ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ПРОТОКОЛУ МЭК 61850

Построение «цифровых» подстанций, являющихся частью проекта SmartGrid по развитию интеллектуальных сетей, требует обеспечения энергоэффективного и экономичного функционирования энергосистемы за счёт скоординированного управления при помощи современных коммуникаций между подстанциями.

«Цифровая» подстанция строится на основе интегрированных цифровых систем измерения, защиты и управления с применением цифровых трансформаторов тока и напряжения и цифровых схем управления.

Разработка цифрового измерительного трансформатора тока и напряжения требует решить ряд задач: выбор оптимальных конструктивных

параметров, обеспечение требуемых температурных и метрологических характеристик и выбор программно-технического обеспечения.

Для реализации процесса передачи и использования цифровых данных был использован комплект разработчика для микросхем фирмы BECK. В качестве микропроцессорного контроллера используется плата DK55 с микросхемой SC24-IEC с поддержкой прикладного программирования на языках стандарта МЭК 61850, применяемого в качестве стандарта для систем автоматизации на подстанции. SC24-IEC представляет собой однокристалльный компьютер со встроенной ОС RTOS и процессором SC186-EX 96 МГц, 8 Мб ОЗУ и 8 Мб Flash. Программирование осуществляется в среде Paradigm C/C++ на языках C/C++. Для работы на языках МЭК 61850 комплект включает адаптированную систему исполнения CoDeSys SP 2.3 Full и инструменты для конфигурирования и создания драйверов входов/выходов.

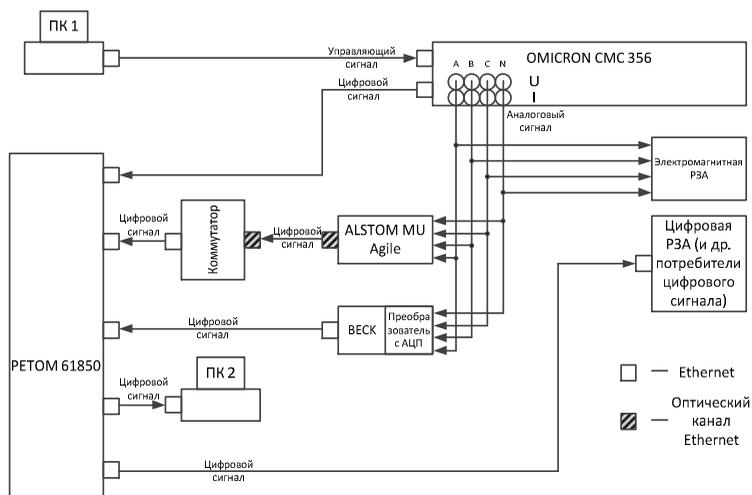


Рис. 1. Схема опыта

Требования, предъявляемые к системе:

- способность микропроцессорного устройства обмениваться технологическими и сервисными данными;
- высокоскоростной обмен данными микропроцессорных электронных устройств между собой;
- высокая надежность;
- гарантированное время доставки;

- минимальное время обработки информации в пределах заданного класса точности;
- соответствие стандартам;
- функциональная совместимость оборудования различных производителей;
- средства поддержки передачи файлов;
- конфигурирование / автоматическое конфигурирование;

Настройка связи осуществляется по сети Ethernet на основе протоколов ТСР/ІР. Для доступа к среде микропроцессорного контроллера используется Telnet, в качестве сетевого протокола для реализации текстового интерфейса. Для передачи файлов на микроконтроллер используется FTP-клиент. Разработка программного обеспечения для микроконтроллера осуществляется в среде Paradigm C/C++ на языках программирования C/C++.

Для работы с протоколом МЭК 61850 формируется ІЕС-61850 -клиент и сервер программного обеспечения Stack PIS-10.

В докладе будут представлены результаты исследования микросхемы SC24-ІЕС, в том числе времени формирования протокола МЭК 61850-9.2LE. Для исследования была сконфигурирована система, состоящая из аппаратно-программного комплекса Omicron CMC 356 и PЕТОМ 61850.

Библиографический список

1. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения // Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110 – 750 кВ станций и подстанций энергосистем: Вестник ИГЭУ. – Вып. 4. – 2006. – С. 35 – 42.
2. **Электроэнергетика** России 2030: Целевое видение / Под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. – М.: Альпина Бизнес Бук, 2008.
3. **Getting Started** – DK55 ІРС@CHIP® Embedded Web Controller Family.
4. **Getting Started** ІРС@CHIP Embedded Web Controller Family ІЕС 61850 Basics.
5. **ІЕС 61850** Protocol API User Manual Protocol Integration Stack.

СЕКЦИЯ 15

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

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

Секретарь – к.т.н., доцент **Сайкин М.С.**

А.М.А. Аль-Шахейти, асп.;
рук. Ю.К. Евдокимов, д.т.н., проф.
(КНИТУ-КАИ, г. Казань)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОДШИПНИК, АКТИВНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС

Активные магнитные подшипники находят все большее применение во многих отраслях промышленности, бесконтактные активные магнитные подшипники применяются для улучшения стабилизации вращения роторных машин.

Электромагнитные подшипники ЭМП состоят из статора с установленными в двух осях четырьмя электромагнитами. Принцип действия ЭМП основывается на эффекте левитации в магнитном поле. Для поддержания, центрирования и контролирования положения вала-ротора устройства, применяются индуктивные датчики перемещения, путем измерения перемещений положения ротора, индуктивные датчики положения устанавливают полную левитацию ротора.

ЭМП применяются в нефтегазовых турбинах, высокооборотных энергетических машинах, а также в компрессорной технике.

Роторы высокооборотных электрических машин с постоянными магнитами обеспечивают их стойкость и обладают достаточно высокую надежность при больших скоростях вращения.

Главным преимуществом ЭМП, по сравнению с традиционными подшипниками является отсутствие полного механического трения, что позволяет отказаться от масла, используемого для повышения вязкости устройства вала-ротора, отсутствия масла позволяет достичь высочайшей надежности также и за счет отсутствия износа узлов машины.

Важной особенностью электромагнитных подвесов является не только обеспечение свободной левитации взвешиваемых тел, но и способность выдавать точную информацию об их смещениях и действующих на них силах [1].

Библиографический список

1. **Осокин Ю.А.**, Герди В.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов – М.: Машиностроение, 1980.

А.М. Синицин, асс.;
рук. В.А. Уланов, д.ф.-м.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ТелЛУРИДА СВИНЦА**

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) могут быть использованы как решение проблемы сбережения энергоресурсов на производствах, где в технологическом цикле заложена необходимость отвода тепла в окружающее пространство. В этой связи актуальным оказывается поиск путей создания новых высокоэффективных термоэлектрических материалов. Поскольку научный прогноз не всегда возможен, такой поиск часто осуществляется методом проб и ошибок. Для этого выбирается базовый материал с высокими исходными характеристиками и, путем легирования или смешивания с другими материалами, производится модификация его свойств.

В данной работе в качестве базового материала выбран теллурид свинца. Второй компонентой смеси являлись теллуриды олова или висмута. Исследуемые образцы изготавливались методом высокотемпературного прессования компонент смеси.

Измеряемыми параметрами являлись коэффициент Зеебека, проводимость и теплопроводность. Были использованы стандартные методы. Измерения проводились в объеме ячейки, где создавались условия технического вакуума или атмосфера инертного газа.

В качестве контактных площадок были выбраны пластины из чистого свинца, «приваренные» с помощью тонкого порошка РbТе к противоположным торцам исследуемого образца цилиндрической формы. Концы потенциальных игольчатых зондов из вольфрама приваривались к боковым поверхностям в непосредственной близости от торцов. Внешние поверхности контактных площадок были шлифованы к рабочим поверхностям нагревателя и термоэлектрического куллера.

Температуры торцов образца измерялись с помощью проволочных термопар, вставленных в отверстия, просверленные в свинцовых кон-

тактных пластинках. Количество теплоты, передаваемой по объему образца от горячего торца к холодному, определялось по мощности питания нагревателя.

Во избежание ошибок измерений, все побочные каналы отбора тепла от нагревателя исключались путем применения теплоизолирующих материалов и устройств типа сосуда Дьюара. Измерялись и анализировались как разности потенциалов между потенциальными зондами, так и контактные разности потенциалов.

*А.С. Кожеко;
рук. Л.В. Толстихина, к.т.н., доц.
(СШФ СФУ, г. Саяногорск)*

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА ВКЛЮЧЕНИЯ АГРЕГАТОВ

Выбор состава агрегатов является одной из важных внутростанционных задач на ГЭС.

Для решения задачи используем технические показатели: расход воды и КПД станции. Критерии оптимального состава:

$$Q = \min;$$
$$\eta = \max.$$

Величины расходов и КПД связаны функционально. Для получения значений данных величин используются энергетические характеристики агрегатов.

Рассмотрена одна из основных характеристик, которая может быть использована для определения наиболее экономичных диапазонов включения гидроагрегатов – расходная характеристика. Для построения расходной характеристики использовалась главная универсальная характеристика гидротурбины ПЛ 60 В.

Диапазон включения агрегатов определяется точкой пересечения расходных характеристик для разного состава агрегатов.

Формирование вариантов по числу агрегатов производится в пределах от минимального до максимального, необходимого для покрытия заданной нагрузки.

По данным характеристикам определим диапазоны включения.

Рассчитаем потери электроэнергии, внутри диапазона включения, при различном составе агрегата. В качестве примера расчет приведен на период один месяц. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Потери электроэнергии

Минимальный напор $H = 32,3$ м					
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$		$\Delta Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta N, \text{ МВт}$	$\Delta W, \text{ кВт}\cdot\text{час}$ (за месяц)	$\Delta W, \text{ руб}/\text{мес}$
Точка включения соответствует выбранному диапазону	Точка включения не соответствует выбранному диапазону				
536	542	6	1,763	1269360	444276
875	893	18	5,118	3684960	1289736
1055	1083	28	7,943	5718960	2001636
Расчетный напор $H = 43,1$ м					
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$		$\Delta Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta N, \text{ МВт}$	$\Delta W, \text{ кВт}\cdot\text{час}$ (за месяц)	$\Delta W, \text{ руб}/\text{мес}$
Точка включения соответствует выбранному диапазону	Точка включения не соответствует выбранному диапазону				
488	499	11	4,311	3103920	1086372
832	848	16	6,244	4495680	1573488
1234	1253	19	7,141	5141520	1799532
Максимальный напор $H = 55,5$ м					
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$		$\Delta Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta N, \text{ МВт}$	$\Delta W, \text{ кВт}\cdot\text{час}$ (за месяц)	$\Delta W, \text{ руб}/\text{мес}$
Точка включения соответствует выбранному диапазону	Точка включения не соответствует выбранному диапазону				
328	343	15	5,619	4045680	1415988
677	698	21	7,928	5708160	1997856
939	974	35	13,126	9450720	3307752

Таким образом, выбор точек диапазона включения гидроагрегатов может существенно влиять на величину потерь электроэнергии и расхода воды. Прогнозируемые потери электроэнергии в среднем снижаются на 2,24 млн. руб./месяц, а потери воды на $169 \text{ м}^3/\text{с}$. Рациональное управление составом агрегатов позволяет снизить потери электроэнергии в сети, что является эффективным решением задачи энергосбережения без нанесения ущерба оборудованию экологии.

Библиографический список

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций/ Т.А.Филиппова. – М.: Энергия, 1975. – 207 с.
2. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. – М.: Энергия, 2007. – 204 с.
3. Веников В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учеб. для вузов / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Вержбицкий В.М. Численные методы. (линейная алгебра и нелинейные уравнения).– М.: Высшая школа, 2000. – 266 с.

*А.А. Кузнецов, А.С. Кожеко, П.М. Белоконев, магистранты;
рук. М.Ф. Носков, д.т.н., проф.
(СШФ СФУ, г. Саяногорск)*

СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Систем мониторинга, обеспечивающих непрерывный контроль измеряемых параметров и сравнение их величин с пороговыми значениями, уже недостаточно. Поддержание оборудования ГЭС в работоспособном состоянии является одной из основных задач эксплуатации. Под работоспособным состоянием национальные и отраслевые стандарты понимают «состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД», т.е. нормативно-технической документации.

Данная задача должна решаться средствами систем мониторинга и контроля состояния оборудования, в рамках которых значение контролируемых параметров, будет принадлежать области допустимых значений.

Существующий подход к организации сигнализации (предупредительной и аварийной) о состоянии оборудования основан на определении момента подачи сигнала или срабатывания устройств защиты по факту достижения контролируемым параметром аварийного или предупредительного значения (так называемый, сухой контакт) [1 – 5]. Срабатывание сигнала предупредительной сигнализации инициирует анализ вызвавшей сигнал информации, который проводится оперативным персоналом станции. Отключение вызывает прекращение электроснабжения потребителей, включение резерва и делает необходимым проведение восстановительных работ. Восстановление агрегата или трансформатора после аварийного отключения достаточно длительная и дорогостоящая процедура, которой весьма желательно избежать путем совершенствования системы мониторинга и контроля.

Целью данной статьи является развитие систем мониторинга основного оборудования ГЭС путем детального анализа технологических параметров в диапазоне значений, не достигающем предупредительной и аварийной сигнализации, что позволит:

- исключить работу оборудования в неблагоприятных режимах (перегрев, повышенная вибрация и т.п.);
- обеспечить возможность своевременного выявления дефектов оборудования и предотвращение их развития в критические, приводящие к невозможности восстановления повреждения оборудования;

- уменьшить число аварийных отключений;
- Применение метода комплексного анализа данных, получаемых от первичных измерительных систем, позволит:
 - повысить эффективность управления и исключить работу оборудования в неблагоприятных режимах (перегрев, повышенная вибрация и т.п.);
 - выявлять дефекты оборудования на ранних стадиях их развития и предотвращать их развитие в критические дефекты, приводящие к невосстановливаемым повреждениям оборудования;
 - уменьшить число аварийных отключений оборудования и недоотпуск электроэнергии.

Библиографический список

1. **Беркович М.А.**, Молчанов В.В., Семёнов В.А. Основы техники релейной защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 367 с.
2. **Ткаченко М.Г.** Применение искусственной нейронной сети, оптимизированной генетическим алгоритмом, в задаче анализа состояния технологического оборудования нефтегазодобывающей промышленности // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014 – Вып. № 7 (156). – С. 262 – 268.
3. **ISO 7919-5:2005.** Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. – P. 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.
4. **Прототипная** экспертная система диагностики технического состояния оборудования электростанций / Соболенко Н.А., Тягунов М.Г., Хоанг К.Т.Д., Шкурин А.Н. // Гидротехническое строительство. – 1995. – № 3 – С. 32 – 37.
5. **Система** контроля и оперативной диагностики оборудования Чиркейской ГЭС // Абакаров А.Р., Алиомаров А.М., Соболенко Н.А., Тягунов М.Г. // Гидротехническое строительство. – 2004. – № 9. – С. 72 – 76.

*Е.С. Гордеев, магистрант;
рук. И.И. Артюхов, д.т.н., проф.
(СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов)*

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА РЕЖИМ РАБОТЫ СВЧ ГЕНЕРАТОРА С ПАКЕТИРОВАННЫМ МАГНЕТРОНОМ

В бытовых печах СВЧ нагрева и в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии применяют пакетированные магнетроны, в которых элементом конструкции являются постоянные магниты [1]. Для работы такого магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Наиболее часто применяется схема (рис. 1), которая совмещает в себе обе эти функции. Основой схемы является силовой трансформатор Т с двумя вторичными обмотками.

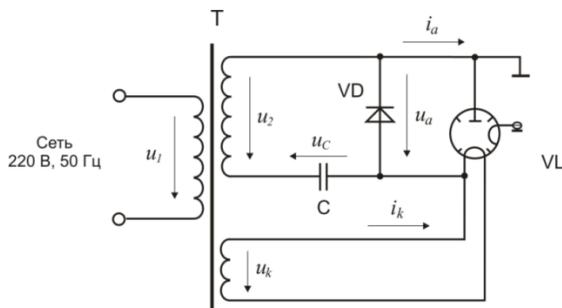


Рис. 1. Схема электропитания пакетированного магнетрона

Недостатком данной схемы электропитания является зависимость мощности СВЧ колебаний от величины сетевого напряжения. Понятно, что для печей бытового назначения это обстоятельство не имеет принципиального значения, так как в случае применения печи в условиях с пониженной величиной сетевого напряжения пользователь устройства просто еще раз включает печь и повторяет процесс нагрева продукта до требуемой температуры. В случае промышленного применения источников СВЧ энергии, схема электропитания которых выполнена по схеме рис. 1, сложно получить необходимые технологические параметры обрабатываемого изделия при изменении величины сетевого напряжения [2].

В результате экспериментального исследования СВЧ генераторов с магнетронами различного типа получены зависимости мощности на аноде магнетрона от величины сетевого напряжения. Такая зависимость для магнетрона 2М214 фирмы LG показана на рис. 2.

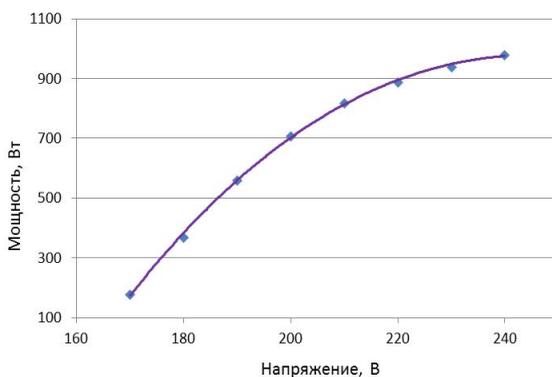


Рис. 2. Зависимость мощности на аноде магнетрона 2М214 от величины сетевого напряжения

Установлено, что устойчивая генерация СВЧ-колебаний магнетрона начинается при сетевом напряжении питания 170 В. При дальнейшем увеличении этого напряжения до 240 В происходит увеличение анодного тока от 50 до 250 мА, при этом рассеиваемая на аноде магнетрона мощность возрастает от 180 до 980 Вт.

Таким образом, для обеспечения требуемого режима работы СВЧ генератора в условиях возможного изменения сетевого напряжения требуется принятие мер по стабилизации напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора в схеме электропитания магнетрона. Радикальное направление решения задачи может состоять в разработке такого схемного решения, которое обеспечит стабилизацию мощности СВЧ колебаний при изменении сетевого напряжения в широких пределах.

Библиографический список

1. **Артюхов И.И.**, Земцов А.И. Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1(54). – Вып. 3. – С. 151 – 56.

2. **Артюхов И.И.**, Земцов А.И. Динамические характеристики магнетронного генератора // Антенны. – 2012. – № 3. – С. 47 – 49.

Р.М. Галиев;
рук. Р.С. Ахметшин, к.т.н., доц.,
Р.Т. Насибуллин, к.т.н., доц.
(НЧИ К(П)ФУ)

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

В последнее десятилетие широкое распространение находят альтернативные источники энергии. Одним из самых распространенных таких источников являются ветрогенераторы различных видов. К настоящему времени изобретено множество различных конструкций ветрогенераторов, характеризующихся различными мощностью, расчетной силой ветра, размерами, коэффициентом использования ветрового потока и т.д., но недостатком существующих конструкций ветрогенераторов является использование специальной мачты, на которой крепится ветрогенератор, разработка конструкции специальной мачты увеличивает затраты на создание ветрогенератора.

Возможным решением данной проблемы является разработка конструкции ветрогенератора, который возможно установить на высотном ин-

женерном сооружении без необходимости разработки специальной мачты. Реализация данного решения дает следующие положительные результаты: уменьшение затрат на разработку конструкции; уменьшение затрат на изготовление, уменьшение вредного воздействия на окружающую среду.

Предлагаемая конструкция ветрогенератора (рис. 1) содержит ветровое подвижное колесо с вертикальными лопастями, окаймляющие его по внешней окружности вертикальные направляющие воздушного потока и электрический генератор. При этом ветровое подвижное колесо с вертикальными лопастями расположено с охватом вокруг периметра высотного сооружения на определённой высоте. Ветровое подвижное колесо окаймлено по внешней окружности двумя кольцами, между которыми установлены вертикальные направляющие воздушного потока. При этом ветровое подвижное колесо в верхней и нижней ее частях имеет опорные колеса с амортизаторами, которые катятся по предусмотренным желобам – направляющим, расположенным с охватом вокруг периметра высотного сооружения на определённой высоте. В нижней части ветрового подвижного колеса предусмотрено также по окружности ленточное зубчатое звено передачи, и в сторону оси высотного сооружения предусмотрена шестерня промежуточного зубчатого звена, сопряжённая с упомянутым ленточным зубчатым звеном передачи. Ось шестерни промежуточного зубчатого звена неподвижна и закреплена на конструкции высотного сооружения. Электрический генератор также неподвижно закреплён вблизи центра высотного сооружения, а зубчатая шестерня на валу генератора сопряжена с упомянутой шестерней промежуточного зубчатого звена. При этом вертикальные направляющие воздушного потока подвижны в своих осях и имеют тяги дистанционного автоматического управления поворотом вокруг своих осей для регулирования направлением воздушного потока.

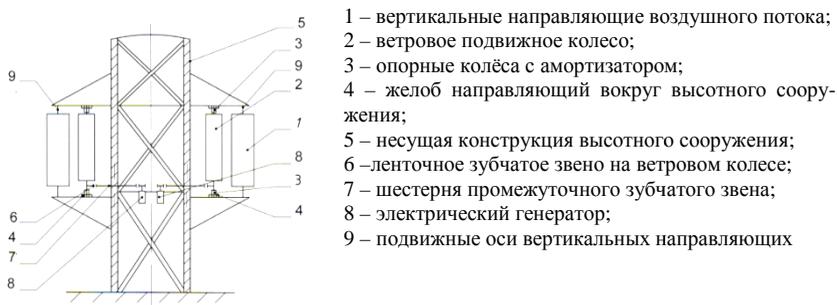


Рис. 1. Конструкция ветрогенератора

Ветрогенератор работает следующим образом. Воздушный поток, регулируемый вертикальными направляющими 1, оказывает давление на лопасти ветрового подвижного колеса 2. За счёт того, что в нижней и верхней частях ветрового подвижного колеса 2 предусмотрены опорные колёса 3, которые катятся по желобу 4 вокруг периметра высотного сооружения 5 по окружности, ветровое подвижное колесо 2 начинает вращаться. Вместе с ветровым подвижным колесом 2 во вращение приходит и ленточное зубчатое звено 6. Через шестерни промежуточного зубчатого звена 7 вращение передается от ленточного зубчатого звена 6 на зубчатую шестерню на валу генератора 8. Вертикальные направляющие воздушного потока подвижны в своих осях 9 и имеют дистанционное автоматическое регулирование направления лопастей, что регулирует направление воздушного потока на лопасти ветряного подвижного колеса 2.

Недостатком разрабатываемой конструкции является усложнение способа крепления ветрогенератора на несущую конструкцию, в качестве которой используется высотное инженерное сооружение.

Библиографический список

1. Пат. РФ № 90042 на полезную модель. Ветроэнергоустановка с автоматически регулируемыми лопастями // Байрамов Ф.Д., Галимов Н.С., Фардеев А.Р.; патентообладатель ГОУ ВПО «Камская государственная инженерно-экономическая академия».

2. Пат. РФ № 2012131299. Ветроэнергетическая установка преимущественно для высотного сооружения // Ахметшин Р.С., Наими Е.К., Насибуллин Р.Т.; патентообладатель ГОУ ВПО «Камская государственная инженерно-экономическая академия».

*С.В. Гаврилова, асп., Э.И. Михайлов;
рук. В.И. Доманов, к.т.н., доц.
(УлГТУ, г. Ульяновск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СОГЛАСОВАННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С внедрением электродвигателя в технике произошел переход от индивидуального и группового привода к многодвигательному приводу. Необходимая мощность для крупных рабочих механизмов обычно составляется из многочисленных мелких двигателей.

На пути технически целесообразного решения часто возникают значительные трудности, в частности тогда, когда пространственно разделенные группы машин должны по технологическим причинам приводиться в действие с абсолютно одинаковыми скоростями вращения. Тре-

бование в отношении согласованного вращения можно выполнить без механических вспомогательных средств, таких как механические валы и редукторные передачи, а чисто электрическим путем. Одна из возможностей заключается в применении электродвигателей с регулируемой скоростью вращения в сочетании с соответствующим управлением согласованной работой. Такое устройство предусматривается, когда рабочий процесс, наряду с необходимостью согласованного вращения, требует также и возможности регулирования скорости вращения.

В существующих схемах согласованного вращения двухдвигательной системы обмотки статора обеих машин присоединены параллельно к сети трехфазного тока. Эти схемы применяются очень широко, однако они являются далеко не единственно возможными и при определенных обстоятельствах, в зависимости от условий применения и желательных эксплуатационных свойств, более хорошие результаты могут дать другие схемы.

Анализ работы двухскоростных асинхронных двигателей показывает возможность создания эффективной системы управления двухдвигательной системой за счет разделения обмоток статора на две независимые обмотки. В этом случае один комплект обмоток статоров машин подключается к питающей сети, а второй комплект служит для обеспечения согласованного управления двухдвигательной системой. Сущность предлагаемого решения поясняется чертежом, на котором показана функциональная схема устройства согласованного вращения двух асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами (рис. 1).

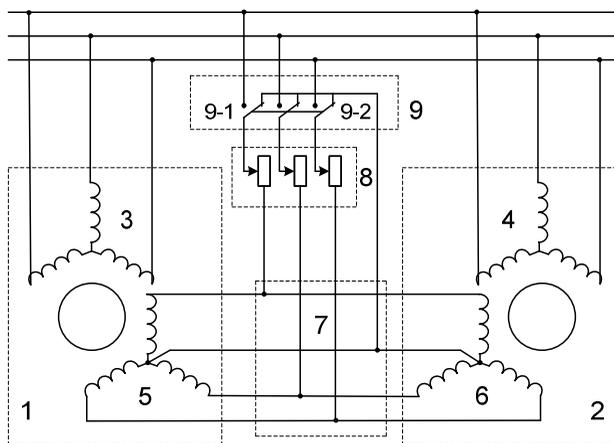


Рис. 1. Устройство согласованного вращения двух асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами

Устройство работает следующим образом: при изменении скорости одного из асинхронных двигателей возникает разность ЭДС, наведенных на группе обмоток 5 и 6, по линиям связи 7 начинают протекать уравнивательные токи. Для асинхронного двигателя с большей скоростью вращения ротора эти токи будут создавать тормозящий момент, а для другого – двигательный. Таким образом, создаваемые моменты действуют как согласующие, и происходит выравнивание скоростей асинхронных двигателей, входящих в систему.

Библиографический список

1. **Доманов В.И.**, Доманов А.В., Гаврилова С.В. Параметрическая автоматизация двухскоростного асинхронного двигателя ISSN 1561-1531. Промышленные АСУ и Контроллеры. – 2015. – № 3. – С. 3 – 7.
2. **Унгру Ф.**, Иордан Г. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. – Л.: Энергия, 1971. – 182 с.

Ф.В. Синева, студ.;
рук. О.В. Филимонова, асс.
(СамГТУ, г. Самара)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АУТОНОМНЫХ ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В климатических условиях Самарской области наибольшую экономическую целесообразность имеет применение комбинированных ветродизельных установок (ВДУ), в качестве автономного источника электроэнергии в южных и восточных районах области, где среднегодовая скорость ветра составляет 5 – 7 м/с. Кроме того, эти районы характеризуются низкой плотностью населения на больших, слабо освоенных в промышленном отношении территориях, в результате чего, стоимость доставки энергоресурса в этой местности превышает его себестоимость.

В настоящее время наиболее актуальным направлением развития ветроэнергетики в Самарской области является разработка комбинированных ВДУ для снабжения электрической и тепловой энергией объектов социальной и образовательной инфраструктуры небольших поселков и деревень. Кроме того, при использовании энергии ветра для теплоснабжения предъявляются невысокие требования к качеству электроэнергии, вырабатываемой ВДУ. Важно лишь, чтобы её количество было достаточно для покрытия тепловой нагрузки. Это приводит к максимальному упрощению конструкции ВДУ (т.к. нет необходимости в использовании

аккумуляторных батарей (АБ) и инвертора), снижению общей стоимости и повышению надежности.

В летний период, когда потребности в теплоснабжении значительно снижаются, ВДУ работает как автономный источник электроэнергии для бытовых нужд. Однако здесь возникают проблемы связанные с утилизацией этой энергии из-за несовпадения графиков нагрузки потребителей и ветровых условий. Как правило, утилизация электроэнергии происходит с помощью АБ, но это не решает задачу полностью – зарядный ток аккумулятора ограничен, поэтому мы предлагаем повышать энергоэффективность ВДУ с помощью применения управляющего балласта.

Управление мощностью балласта осуществляется с помощью полупроводниковых регуляторов, построенных по принципу фазового регулирования. В качестве балластной нагрузки можно использовать электронагревательные элементы, обеспечивающие потребителя горячей водой. Также для повышения энергоэффективности ВДУ необходимо правильно выбрать тип генератора. В современной литературе представлены, как правило, типовые схемы ВДУ большой и средней мощности, где используются генераторы с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов [1]. В нашем случае, мы исследовали энергоэффективность применения ВДУ в небольших населенных пунктах Самарской области, где мощность генератора не превышает 17 кВт, и работа всей установки происходит в условиях случайной скорости ветра и случайного характера изменения сопротивления нагрузки.

Проведенные нами исследования и компьютерное моделирование показало, что наиболее оптимальным для такого случая, является выбор генератора на постоянных магнитах, который прост по конструкции, надежен и не требует дополнительного питания со стороны обмотки возбуждения. Отсутствие трансформатора и редуктора улучшает массогабаритные показатели системы, а применение буферной аккумуляторной батареи достаточной емкости, постоянно подсоединенной к нагрузке, обеспечивает более стабильное напряжение ВДУ в условиях случайных колебаний скорости ветра и мощности нагрузки.

При оценке экономической эффективности и срока окупаемости ВДУ в условиях Самарской области были сделаны следующие выводы:

1. При использовании ВДУ по двум направлениям – для тепло- и электроснабжения, средний срок окупаемости составляет 5 лет;
2. Применение ВЭУ малой и средней мощности (до 15 – 17 кВт) экономически эффективно при скоростях ветра 4 – 7 м/с;
3. В условиях степной и лесостепной зоны удаленных и малонаселенных районов Самарской области ветроэнергетика является оптимальным источником возобновляемой электроэнергии.

Таким образом, перспективы использования в Самарской области энергии ветра как источника снабжения автономного потребителя электрической и тепловой энергией имеют большой потенциал.

Библиографический список

1. Лукутин Б.В. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций / Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова, А.И. Муравлев // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 2008. – № 6. – С. 63 – 66.

В.Д. Сандаков, А.Н. Подрезов, асп.;
рук. И.М. Валеев, д.т.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

ПРИМЕНЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД

На 70-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН 2015 года В.В. Путин обратил внимание на проблему экологии: «...устанавливая квоты на вредные выбросы, мы снимем остроту проблемы лишь на какой-то срок, но кардинально ее не решим. Нам нужны качественно иные подходы, новые технологии, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют в гармонии с окружающим миром».

Проанализировав электрофизические методы очистки газов в поле стримерной короны, мы пришли к выводу, что на энергетические характеристики оказывает влияние не только форма и конструкция, но и физико-химический состав электродов.

На базе ранее разработанной конструкции [1] для конверсии топочных газов в поле стримерной короны были проведён ряд экспериментов. От регулируемого источника высокого напряжения в реакционную камеру подавалось напряжение. В качестве электрода был выбран монокристалл никеля с плоскостью среза (111) и площадью 1,5 см, выращенный методом Бриджмена [2] в Казанском физико-техническом институте Российской Академии Наук.

Определение степени очистки осуществлялось газоанализатором Testo 350-S/-XL при следующих параметрах: расход газа 30 – 40 л/мин., первоначальная концентрация SO₂ – 170 – 180 ppm, диапазон амплитуд импульсных напряжений (U₊, U₋) – 12 кВ, регулируемая частота – 5 – 500 Гц, длина реакционной камеры – 230 мм, диаметр – 65 мм.

Основой технологического процесса очистки газов является взаимодействие наработанных в поле стримерной короны химически активных

частиц (O_3) с диоксидами серы (SO_2). Моделирование выхода активных частиц в канале стримера является процессом, сопряженным с рядом трудностей и проблем. Вследствие чего применялся приближенный способ вычисления концентраций активных компонентов в стримерном канале, основанный на введении G-факторов [3]. В рамках данного способа концентрация i -го компонента определяется:

$$n_i = \frac{\sum_j G_{ij} \cdot x_j \cdot w_{st}}{100},$$

где G_{ij} – количество частиц сорта i , возникших из молекул сорта j на 100 эВ введенной в газ электрической энергии; x_j – мольная доля j -го компонента, из которой в области высокого поля возникает i -й компонент; w_{st} – некоторая часть энергии, введенной в единицу объема стримера, затраченная на образование активных компонентов.

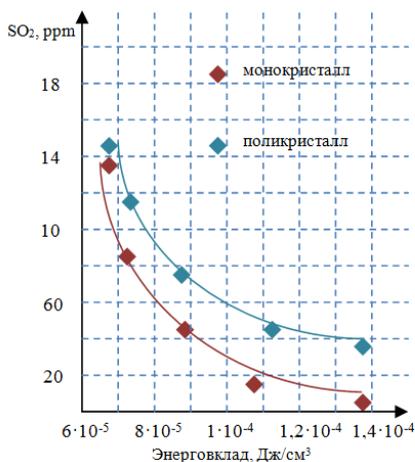


Рис. 1. Изменения концентрации SO_2 от энерговклада в стримерную корону

В результате измерений и расчетов нами были получены зависимости изменения концентраций O_3 и SO_2 от энерговклада в стримерную корону. Анализируя результаты, следует отметить высокую эффективность процесса удаления SO_2 (Рис. 1), что напрямую связано с использованием новых технологий и материалов.

Библиографический список

1. Баладин А.А. Катализ // Тр. Первого Междунар. конгресса. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 38 с.

2. Пат. №144782 РФ. Устройство очистки газовых сред. 30.07.2014 // Валеев И.М., Подрезов А.Н.

3. Penetrante В.М. Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control. Part A. NATO ASI Series. – 1993 – 34. – 65 – 89.

А.В. Танаев, студ.;
рук. А.Н. Проценко, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ДВУХСЛОЙНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

Рассмотрим вопрос о распространении плоской линейно поляризованной электромагнитной волны в проводящей среде. Рассматриваемая область представляет собой совокупность двух проводящих сред с неодинаковыми физическими свойствами. Точку отсчета совместим с внешней границей проводящей среды.

В ходе распространения в толще проводящей среды волна встречает плоскую границу раздела двух сред S . Электромагнитная волна, падая на границу двух сред, частично от нее отражается. Таким образом, в первой среде (I) будет иметь место падающая (индекс p) и отраженная (индекс o) волны, во второй (II) – только преломленная волна.

Запишем начальные условия.

$$\dot{H}(0, \pi/4) = \dot{H}_a, \quad \dot{E}(0, \pi/4) = \dot{E}_a. \quad (1)$$

Определим граничные условия.

На границе раздела двух сред в проводящем пространстве должны быть равны тангенциальные составляющие напряженности электрического поля и тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля:

$$\dot{E}_{1//} + \dot{E}_{1o} = \dot{E}_2 \Big|_S, \quad \dot{H}_{1//} + \dot{H}_{1o} = \dot{H}_2 \Big|_S, \quad (2)$$

где S – граница между первой и второй средой.

Для того чтобы получить уравнения, описывающие распространение электромагнитной волны в проводящем пространстве с проводимостью γ и магнитной проницаемостью μ_a , обратимся к первому и второму уравнениям Максвелла, записанным в комплексной форме для синусоидально изменяющихся величин H и E для проводящей среды:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{H} &= \gamma \dot{E} \\ \operatorname{rot} \dot{E} &= -j\omega \mu_a \dot{H} \end{aligned} \quad (3)$$

Решая эти уравнения совместно, получим [1]:

$$\nabla^2 \dot{H} = j\omega\gamma\mu_a \dot{H} . \quad (4)$$

В общем случае, когда \dot{H} зависит от всех трех координат, решение довольно сложно. Однако для качественного исследования характера распространения электромагнитной волны в двухслойной среде достаточно рассмотреть решение этого уравнения для частного случая – плоской волны. Повернем координатные оси таким образом, чтобы вектор \vec{E} был направлен вдоль оси Ox , а вектор \vec{H} вдоль оси Oy . Электромагнитная волна распространяется вдоль оси Oz . Так как \dot{H} является функцией только одной переменной, в уравнении (4) заменим частную производную полной:

$$\frac{d^2 \dot{H}}{dz^2} = j\omega\gamma\mu_a \dot{H} \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка, которое описывает распространение электромагнитной волны. Решая уравнение (5), получим:

$$\dot{H} = \dot{C}_1 e^{pz} + \dot{C}_2 e^{-pz}, \quad (6)$$

где \dot{C}_1 и \dot{C}_2 – постоянные интегрирования.

Решая данное уравнение с учетом системы (3) запишем уравнения падающей волны в первой среде:

$$\dot{H} = \dot{H}_a e^{-kz} e^{-jkz} e^{j\psi_a}, \quad (7)$$

$$\dot{E} = \dot{H}_a \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} e^{-kz} e^{-jkz} e^{j\psi_a} e^{i45^\circ}. \quad (8)$$

Окончательно уравнения, описывающие напряженность магнитного поля в проводящем пространстве, принимают вид (9):

$$\begin{cases} \dot{H}_1 = \dot{H}_a e^{-k_1 z} e^{-jk_1 z} e^{j\psi_a} + \frac{Z_{B1} - Z_{B2}}{Z_{B1} + Z_{B2}} \dot{H}_a e^{k_1(z-2z_1)} e^{jk_1(z-2z_1)} e^{j\psi_a} & z \in [0; z_1] \\ \dot{H}_2 = \frac{2Z_{B1}}{Z_{B1} + Z_{B2}} \dot{H}_a e^{j[(k)_2 - k_1]z_1 - k_2 z} e^{j[(k)_2 - k_1]z_1 - k_2 z} e^{j\psi_a} & z \in [z_1; \infty) \end{cases}$$

В свою очередь уравнения, описывающие напряженность электрического поля в проводящем пространстве, могут быть записаны в виде (10):

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = Z_{B1} \dot{H}_a e^{-kz} e^{-jkz} e^{j\psi_a} + \dot{H}_a Z_{B1} \frac{Z_{B2} - Z_{B1}}{Z_{B1} + Z_{B2}} e^{k_1(z-2z_1)} e^{jk_1(z-2z_1)} e^{j\psi_a} & z \in [0; z_1] \\ \dot{E}_2 = \dot{H}_a \frac{2Z_{B1} Z_{B2}}{Z_{B1} + Z_{B2}} e^{j[(k)_2 - k_1]z_1 - k_2 z} e^{-jkz} e^{j\psi_a} & z \in [z_1; \infty) \end{cases}$$

Библиографический список

1. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.

А.В. Танаев, студ.;
рук. А.Н. Проценко, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ДВУХСЛОЙНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ (продолжение)

Проанализируем полученные ранее уравнения для частного случая двухслойной среды, возникающего в процессе индукционного нагрева деталей для последующей закалки. Известно, что когда температура поверхностного слоя нагреваемой детали достигает температуры точки Кюри, у ее поверхности формируется парамагнитный слой. При этом магнитная проницаемость внешнего слоя уменьшается до значения магнитной проницаемости вакуума. В то же время магнитная проницаемость внутренних слоев не изменяется. Относительную магнитную проницаемость внутренних слоев примем равной 15. Проводимость I и II сред вблизи границы S будем считать равной и неизменной. Определим «степень отражения» электромагнитной волны от границы раздела двух сред. Для этого воспользуемся первым уравнением системы (10):

$$\frac{\dot{E}_{10}}{\dot{E}_{1п}} = -\frac{\dot{H}_{10}}{\dot{H}_{1п}} = \frac{Z_{в2} - Z_{в1}}{Z_{в1} + Z_{в2}},$$

где $Z_{в} = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}}$.

Исследуем данное уравнение в зависимости от относительной магнитной проницаемости второй среды.

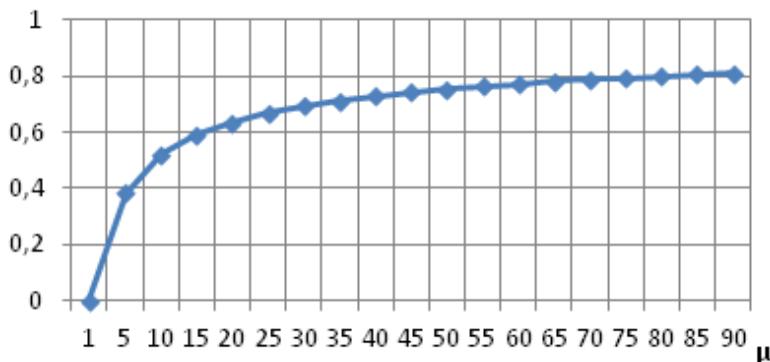


Рис. 1. Степень отражения электромагнитной волны от границы раздела двух сред в зависимости от магнитной проницаемости второй среды

Из графика, представленного на рис. 1, видно, что при принятых характеристиках I и II отражается 59 % падающей волны. Из систем уравнений (9) и (10) следует, что электромагнитная волна испытывает отражение от плоской границы раздела сред S с сохранением знака у напряженности электрического поля и со сменой знака на противоположный у напряженности магнитного поля. В результате, в I среде увеличивается напряженность электрического поля и происходит ослабление магнитного поля, а во второй среде наоборот.

Согласно уравнению энергетического баланса Умова–Пойнтинга, энергия электромагнитного поля идущая на нагрев проводящего тела зависит от напряженности электрического поля. Поэтому проиллюстрируем полученные выше результаты на примере графика ее мгновенных значений, построенные на основании уравнения (10).

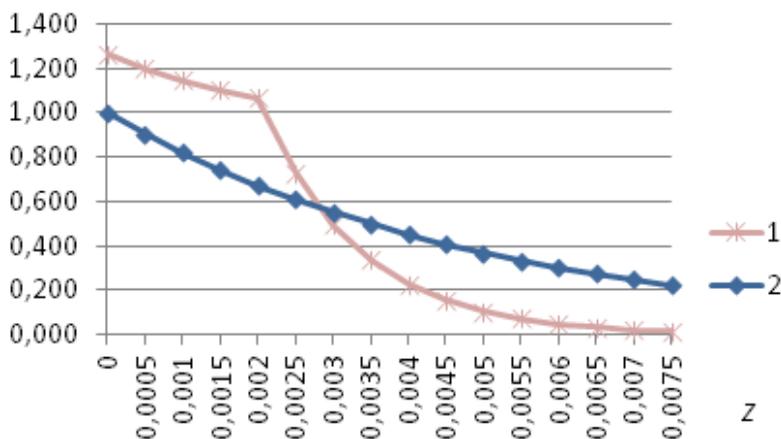


Рис. 2. Мгновенные значения электрического поля в двухслойной (1) и однородной (2) проводящих средах

На рис. 2 изображены следующие графики: 1 – мгновенные значения напряженности электрического поля для случая двухслойной среды; 2 – мгновенные значения напряженности электрического поля для однородной среды. Графики построены для $f = 10000$ Гц, $z_l = 0,002$ м и начальной фазы $\psi a = 90^\circ$

Приведенные на рису. 2 графики согласуются с ранее сделанными выводами. Таким образом, применение двухслойной модели нагреваемой детали обеспечивает повышение точности расчетов по сравнению с однослойной моделью.

Я.К. Старостина, асп.;
рук. С.Н.Сидоров, к.т.н., доц.
(УлГТУ, г.Ульяновск)

ПУСКО-РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВО НА ДИОДНО-ТРАНЗИСТОРНОМ МОДУЛЕ

Одним из приоритетов государственной научно-технической политики последнего времени служит экономное расходование промышленными объектами электрической энергии [1]. Наиболее распространённым потребителем электроэнергии в стране признан асинхронный электропривод. По разным оценкам на него приходится от 60 до 70 % всего объёма промышленно потребляемой электроэнергии [1].

Возможности экономного расходования электроэнергии в асинхронных приводах, как правило, реализуются не в полном объёме. Традиционно асинхронные двигатели используются в длительных режимах с малыми перерывами в работе, обусловленными посменной работой в течение суток или другими временными интервалами в течение года. При этом режим длительной продолжительности включения ($PВ \geq 60\%$) не всегда обусловлен технологической необходимостью, превращая работу на холостом ходу чуть ли не в постоянный режим включённого состояния в течение суток. [4] Как правило это объясняется стремлением избежать неблагоприятного влияния пусковых токов АД на качество напряжения в распределительных сетях предприятия. Известно, что прямой пуск асинхронного двигателя от питающей сети сопровождается броском тока статорных обмоток, не менее, чем в 5 – 7 раз превышающим номинальный уровень, а также «рывком» динамического момента и скорости вала [2]. Эта особенность создаёт значительные трудности эксплуатации двигателей средней и большой мощности, так как приводит к технологическим сбоям и просадкам сетевого напряжения, нарушающим нормальный режим электропитания других потребителей электроэнергии.

Поиск путей повышения коэффициента мощности приводит к очевидному решению устранить работу АД на холостом ходу, заменив длительные режимы на повторно-кратковременную работу лишь во время нагрузений. Увеличивающееся при этом количество запусков привода в течение суток требует более частого использования устройств плавного пуска, вплоть до придания последним статуса обязательной составной части асинхронного привода.

Целью данной работы является описание устройства для плавного пуска асинхронного двигателя.

На рис. 1 изображена схема пуско-регулирующего устройства, выполненного по минимальной структуре на одном силовом транзисторе, размещённом в общей для всех фаз трансформатора цепи. В случае соединения первичных обмоток по схеме звезды такой цепью является нулевая точка звезды, функции которой в схеме рис. 2 выполняет единственный силовой транзистор $VT1$ на выходе диодного моста $VD1$.

Можно видеть, что коммутации транзистора в этой схеме способны привести к одновременному регулированию напряжения вольтодобавки во всех трёх статорных обмотках двигателя, причём этот процесс происходит без прерывания и заметного искажения формы токов на сетевом входе и в статорных обмотках двигателя.

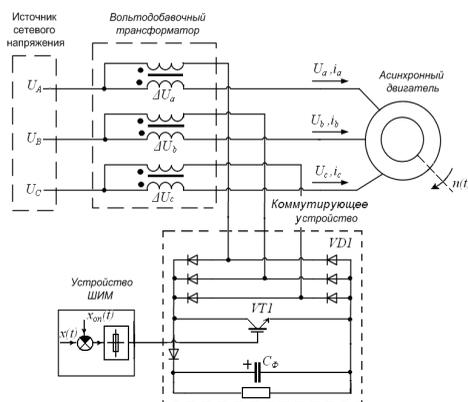


Рис. 1. Схема малоэлементного пуско-регулирующего устройства.

Предлагаемый вариант пуско-регулирующего устройства на основе малоэлементного импульсного регулятора в цепях вольтодобавочного трансформатора устраняет недостатки альтернативных решений, часто выражающихся в неоправданно большом количестве полупроводниковых ключей, а так же в существенных искажениях напряжений и токов.

Библиографический список

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2020 г. // ТЭК. – 2003. – С. 5 – 37.
2. **Розанов Ю.К.** Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
3. **Кобзев А.В.** и др. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. **Браславский И.Я.,** Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И.Я. Браславского. – М.: Academia, 2004.

А.Е. Евдаков, студ.;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕПЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

В настоящее время расчёт динамических режимов сложных цепей, содержащих линейные элементы, не представляет сложностей, и производится на ЭВМ численными методом специализированными программными продуктами.

Одним из современных пакетов, реализующих численные методы, является MATLAB, который расшифровывается, как «матричная лаборатория». По сути это высокоуровневая среда программирования, содержащая множество функций и встроенных пакетов. Одним из таких пакетов является Simulink.

Simulink – это графическая среда, благодаря которой алгоритмы, построенные в ней довольно наглядны. С помощью пакета решений SimPowerSystems в ней легко моделируются установившиеся и переходные процессы в линейных электрических цепях. Однако при моделировании цепей, содержащих нелинейные электромагнитные устройства (ЭМУ), возникает ряд сложностей с описанием магнитного поля, поэтому является важной задачей разработка подпрограмм, производящих данный расчёт на каждом шаге численного интегрирования состояния электрической цепи. В качестве примера на рис. 1 приведена схема цепи электроснабжения, содержащая трёхфазный трансформатор, где наряду с линейными элементами присутствует нелинейный трехфазный трансформатор.

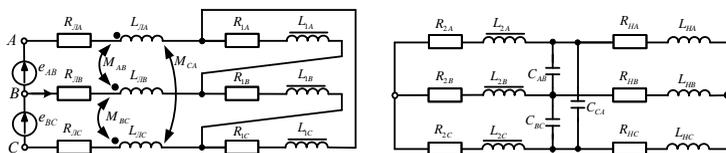


Рис. 1 Схема цепи электроснабжения, содержащей трехфазный трансформатор, соединённый по схеме Δ/Y

Возможность использования Simulink для моделирования таких нелинейных цепей зависит от вида характеристик нелинейных элементов. При монотонной зависимости потокосцеплений ветвей ЭМУ от токов уравнения переменных состояния для ЭМУ в нормальной форме можно полу-

чить всегда, при этом в качестве этих переменных могут быть взяты как потокосцепления, так и токи ветвей.

Если напряжения ветвей ЭМУ, обусловленные ЭДС само- и взаимодуции, на каждом шаге численного интегрирования уравнений, описывающих состояние электрической цепи, можно было бы выразить через производные токов этих ветвей:

$$[u_E] = [L_B] \frac{d[i_B]}{dt},$$

где элементы матрицы $[L_B]$ определяются токами ветвей ЭМУ, то Simulink легко можно было бы адаптировать к расчету цепей, содержащих нелинейные ЭМУ.

Это можно сделать на основе подпрограммы анализа магнитной цепи ЭМУ. Магнитная цепь ЭМУ при любых токах и напряжениях ее ветвей может быть представлена аналоговой схемой замещения с сосредоточенными параметрами, которая будет содержать нелинейные и линейные магнитные проводимости и источники МДС. В качестве примера на рис. 2 изображена магнитная цепь трехфазного трехстержневого трансформатора, входящего в цепь на рис. 1.

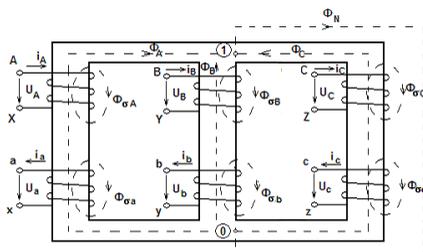


Рис. 2. Магнитная цепь трехфазного трехстержневого трансформатора

Представление магнитного поля ЭМУ для любого момента времени схемой замещения в виде дискретных линейных и нелинейных проводимостей и источников МДС позволяет от локальных значений векторов напряженности и индукции магнитного поля перейти к интегральным скалярным значениям потока и магнитного напряжения участков магнитной цепи. Это дает возможность применить к анализу поля и получению уравнений связи между мгновенными токами и потокосцеплениями ветвей методы теории линейных и нелинейных схем.

В работе приведены алгоритмы, позволяющие использовать Simulink для расчета цепей с нелинейными ЭМУ, и написана программа, реализующая данную задачу. Модель является универсальной и позволяет ана-

лизировать переходные, установившиеся и аварийные режимы работы различных цепей с нелинейными элементами.

А.В. Самсонов, студ.;
рук. К.В. Куликов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ НА РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ИНВЕРТОРНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

Проектирование современных инверторных источников питания во всем спектре мощностей является многокритериальной задачей. Основное преимущество данного устройства – это улучшенные массогабаритные и технологические показатели. Это стало возможным с появлением в последние десятилетия электронных ключей и модулей, созданных по технологиям IGBT или MOSFET. В области сварки, по исследованиям шведской промышленной компании ESAB (Elektriska Svetsnings Aktiebolaget), более 70 % сварочного оборудования содержит силовую часть, построенную по инверторной схеме, которая обеспечивает устойчивое горение дуги, стабильный режим работы, гибкую настройку системы и безопасное обслуживание установок. Отличие инверторных источников питания заключается в том, что сетевое напряжение выпрямляется и преобразуется в переменное напряжение с частотой выше 60 (кГц), питающее сварочный трансформатор. За счет этого его габариты и масса становятся существенно меньше, снижается реактивная составляющая потребляемой мощности, увеличивается КПД, что обуславливает значительную экономию энергопотребления. Но при повышенных частотах увеличиваются потери в трансформаторе и в силовых ключах.

Кроме того, при работе на высоких коммутирующих частотах резонансные частоты в трансформаторе весьма близки к рабочим. Это может приводить к снижению надежности системы в целом.

Следует отметить, что вопрос резонансных частот в инверторах в современной литературе раскрыт достаточно слабо.

Данная работа посвящена исследованию влияния основных конструктивных параметров на резонансные частоты.

В работе применена методика расчета, направленная на оптимизацию массогабаритных показателей при максимальном КПД, учитывающая перегрев трансформатора и силовых транзисторов [1].

При проектировании за переменные параметры были приняты: рабочая частота инвертора и сечение проводов при постоянстве плотности тока.

От второго параметра зависит масса активных материалов, что влияет, в основном, на стоимость установки. Следовательно, в наших исследованиях за основной изменяемый параметр примем рабочую частоту. Так как современные инверторы работают на частотах выше 60 кГц, в исследованиях был выбран диапазон изменения частот от 80 до 130 кГц.

Высокочастотный трансформатор является сложной, с точки зрения резонансных явлений, системой. Такой трансформатор может быть подвержен диэлектрическому отказу из-за высокочастотных переходных состояний, например в результате переключений, поэтому мы должны рассчитать несколько резонансных частот. Как сказано выше резонансные частоты могут быть близки к рабочим частотам, поэтому, был произведен расчет резонансных частот и определены их границы изменения рабочей частоты.

Результаты приведены на рис. 1 и 2:

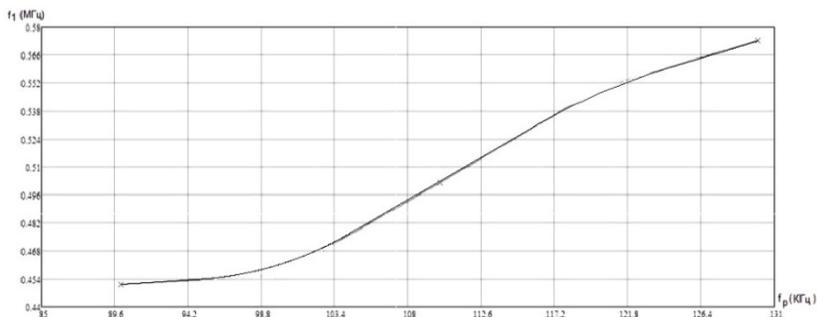


Рис. 1. График зависимости первой резонансной частоты f_1 (МГц) от рабочей частоты f_p (кГц)

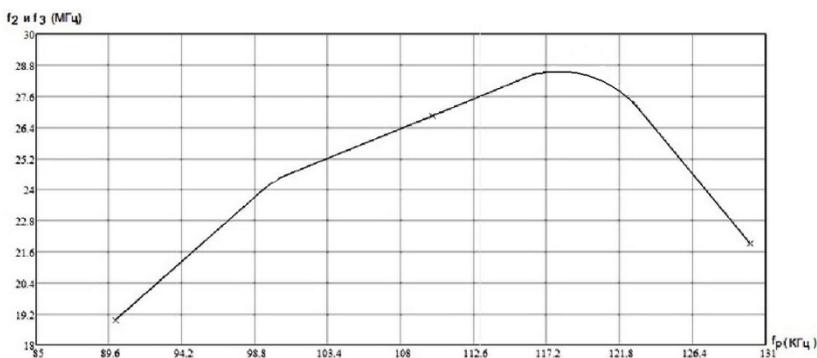


Рис. 2. График зависимости второй и третьей резонансных частот f_2 и f_3 (МГц) от рабочей частоты f_p (кГц)

Библиографический список

1. Эраносян С.А. Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

*Ю.О. Шапина, студ.;
рук. И.Ю. Долгих, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЁТОМ
КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ**

Одним из методов моделирования индукционного нагрева является метод условной декомпозиции [1, 2], позволяющий исследовать динамику температурных и электромагнитных процессов в изделии с учётом характеристик источника питания. В этом случае передача энергии от источника в слои изделия описывается уравнениями многообмоточного трансформатора и характеризуется их собственными активными и реактивными сопротивлениями, а также коэффициентами взаимной индуктивности между индуктором и слоями и слоёв между собой. При этом их значения могут быть определены с использованием компьютерных программ полевого моделирования, например, в Elcut. В то же время при исследовании индукционного нагрева ферромагнитного материала необходимо учитывать его кривую намагничивания, оказывающую влияние на входные параметры модели и, как следствие, конечные результаты моделирования.

В этой связи исследование рационально проводить в два этапа, на первом из которых проводится прикидочный расчёт токов в слоях при использовании параметров модели, полученных при постоянном значении магнитной проницаемости. Далее по кривой намагничивания материала изделия рассчитывается и строится график зависимости дифференциальной магнитной проницаемости от величины тока слоя и определяется её значение для каждого слоя, которое в дальнейшем используется при определении уточнённых параметров модели.

В целом использование предложенного метода моделирования позволило получить уточнённые характеристики индукционного нагрева и сделать выводы о необходимости их учёта при исследовании конкретных технологических процессов.

Библиографический список

1. Долгих И.Ю., Королёв А.Н., Захаров В.М. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве / Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ). – 2014. – Вып. 5. – С. 57 – 63.

2. Волков А.С., Долгих И.Ю. Разработка декомпозиционного метода исследования индукционно-стыковой сварки / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. – 2015. – № 2 (33). – С. 64 – 69.

А.В. Алейников, асп.;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.,
А.Н. Голубев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОВ МНОГОФАЗНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЛУЧШЕННЫМИ ВИБРОШУМОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В настоящее время широкое распространение получили магнитоэлектрические двигатели в регулируемых приводах различных машин и механизмов. При этом все более жесткими становятся требования к их виброшумовым характеристикам. Основной составляющей магнитных шумов двигателя является пульсация радиальной электромагнитной силы. Используя современные микропроцессорные системы управления возможно, формировать токи статорной обмотки по заданному алгоритму, позволяющему снизить эти пульсации.

В любой момент времени возможно, зная текущее положение ротора, вычислить токи ветвей, необходимые для создания заданного значения электромагнитного момента [1]. По этим значениям можно определить величины радиальных сил, действующих на зубцы статора двигателя [2].

Проведенные исследования показали, что полностью устранить пульсации радиальной электромагнитной силы при помощи соответствующего формирования токов не представляется возможным. Это связано с тем, что, когда зубец находится над границей полюсов постоянных магнитов, часть магнитного потока замыкается через данный зубец. В связи с этим изменение магнитного потока данного зубца, создаваемого статорной обмоткой, не изменит значение радиальной силы до тех пор, пока суммарный магнитный поток не перестанет замыкаться через данный зубец. На эти зубцы действует сила с минимальным значением, следовательно, управлять токами необходимо так, чтобы уменьшать наибольшую силу, действующую на зубцы.

Программа в цикле выбирает зубец с максимальной радиальной силой, определяет увеличение или уменьшение тока зубцового контура необходимо для уменьшения радиальной силы, вычисляет новые фазные токи, и повторяет до тех пор, пока не будет превышено ограничение по амплитуде и действующему значению фазного тока. Среднеквадратичное значение фазного тока находится из мгновенных значений тока по формуле (1).

$$I = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m i_k^2}, \quad (1)$$

где I – среднеквадратичное значение фазного тока; i – мгновенное значение фазного тока; m – число фаз двигателя.

Разложив получившуюся кривую в ряд Фурье, получим спектр нечетных гармоник. Оставив гармоники с порядковым номером, меньшим числа фаз. Получаем функцию тока, максимально снижающую пульсации сил, действующих на зубцы, без пульсаций электромагнитного момента при данных ограничениях по питанию.

На рис. 1 представлены кривые изменения радиальных сил, действующих на зубец девятифазной синхронной машины с номинальным электромагнитным моментом $M = 17$ Нм при питании ее синусоидальным током и током, полученным по предложенному алгоритму, форма которого представлена на рис. 2.

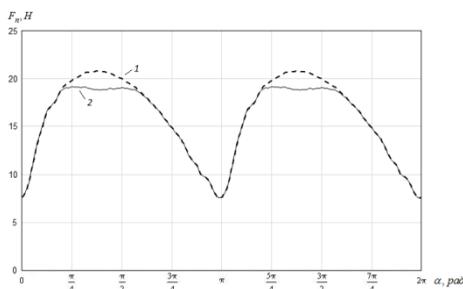


Рис. 1. Радиальная сила, действующая на зубец статора. 1 – при синусоидальных токах, 2 – при токах, полученных по предложенному алгоритму

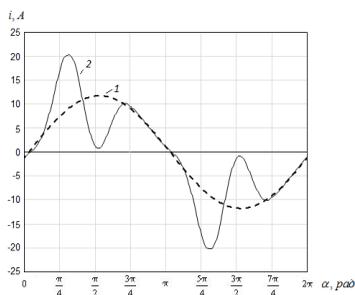


Рис. 2. Фазный ток, 1 – синусоидальный, 2 – полученный по предложенному алгоритму

Предложенный алгоритм позволяет при незначительном увеличении потребляемой мощности исключить пульсации электромагнитного момента и снизить максимальный перепад радиальной электромагнитной силы.

Библиографический список

1. **Мартынов В.А.**, Голубев А.Н., Алейников А.В. Математическое моделирование режимов работы многофазных синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 2. – С. 62.

2. **Мартынов В.А.**, Голубев А.Н., Алейников А.В. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 1. – С. 10.

В.Д. Карачёв, асп.;
рук. А.Н. Голубев, д.т.н., проф.,
В.А. Мартынов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

**УЛУЧШЕНИЕ ВИБРОШУМОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
МНОГОФАЗНОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Магнитные шумы обусловлены магнитными силами – радиальными, тангенциальными и осевыми – изменяющимся во времени и пространстве и действующими между отдельными частями машины. Если тангенциальные силы являются функциями электромагнитного момента, то радиальные определяются силами, вызывающими деформацию статорного кольца, то есть являются функцией пространственного распределения индукции в воздушном зазоре машины. Широкие возможности целенаправленного воздействия на конфигурацию магнитного поля и на виброшумовые характеристики открывает увеличение числа фаз статорной обмотки [1].

Снижение шумов и вибраций путем применения многофазных машин ($m > 3$) обусловлено уменьшением тангенциальных сил, вызванных пульсациями электромагнитного момента СД. Таким образом, при одинаковой форме несинусоидального питающего напряжения, многофазная система демонстрирует прямо пропорциональное увеличение частоты пульсаций электромагнитного момента при снижении их амплитуды по экспоненциальному закону, что соответственно расширяет диапазон регулирования.

Другой причиной возникновения вибраций является действующая в любой точке воздушного зазора радиальная магнитная сила, величина которой пропорциональна квадрату индукции в зазоре. Эта сила вызывает динамические деформации статорного кольца, которые соответственно являются источником магнитных шумов [2].

При рассмотрении вопроса улучшения виброшумовых показателей ЭП следует поставить задачу компромиссной минимизации действующе-

го значения тока статора и магнитных шумов при сохранении требуемого электромагнитного момента. Рассчитанные функциональные зависимости вводятся в многоканальную САУ многофазными СД с улучшенными виброшумовыми характеристиками с помощью функциональных блоков.

В качестве примера на рис. 1 приведена расчетная кривая фазного тока $i(\omega t)$ 9-фазного СД ($P_n = 2300$ Вт, $\omega_n = 157$ рад/с) при 50 %-м снижении шума. На рис. 2 приведены расчётные значения механических напряжений $Q_n(l)$ вдоль внешней поверхности половины кольца статора: 1 – для синусоидальных фазных токов; 2 – для токов предложенной формы.

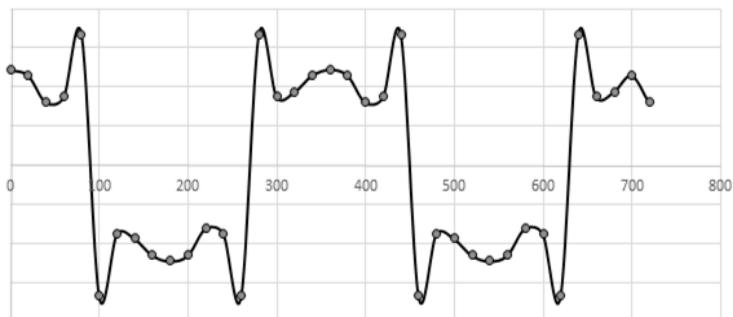


Рис. 1. Оптимальная форма кривой фазного тока

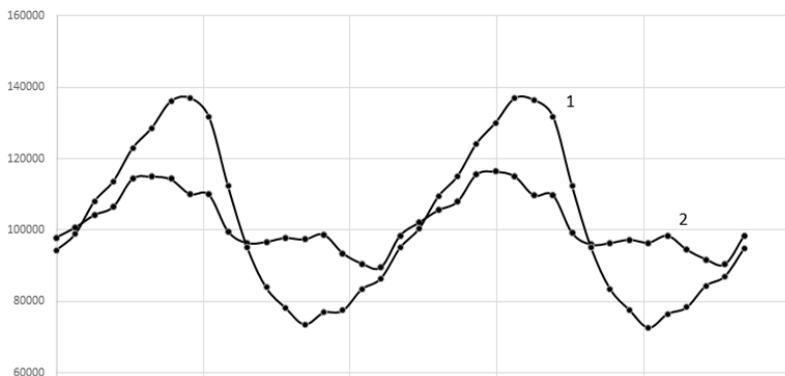


Рис. 2. Кривые механических напряжений Q_n , Н/м²

Библиографический список

1. Голубев А.Н., Лапин А.А. Многофазный синхронный регулируемый электропривод: научное издание / ГОУВПО ИГЭУ. Иваново, 2008. – 156 с.
2. Голубев А.Н., Лапин А.А. Математическая модель синхронного двигателя с многофазной статорной обмоткой // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 8 – 13.

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

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

В настоящее время, разработано большое количество конструкций магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) для валов, совершающих вращательное движение. Многообразие конструкций обусловлено техническими задачами, для решения которых они предназначены. Использование этих конструкций для герметизации валов возвратно-поступательного движения не обеспечивает требуемого ресурса работы и надёжной герметизации валов. При использовании конструкций МЖГ предназначенных для герметизации вращающихся валов для решения задач герметизации валов с возвратно-поступательным движением, происходит унос магнитной жидкости (МЖ) из рабочего зазора. Это связано с силой межмолекулярного взаимодействия материала вала и магнитной жидкости (МЖ). Она значительно превышает пондеромоторную силу, удерживающую МЖ в рабочем зазоре герметизатора.

Разработка конструкций МЖГ, совершающих возвратно-поступательное движение, необходима для решения задач герметизации валов электротехнологических установок, например, кристаллизаторов, которые используются при изготовлении постоянных магнитов.

При разработке МЖГ возвратно-поступательного движения необходимо создать условия, при которых объём МЖ в рабочем зазоре не будет изменяться при перемещении вала. Для решения этой задачи предлагается конструкция, в которой совместно с МЖГ используется газодинамическое уплотнение (рис. 1). Магнитная жидкость 1, заправлена в рабочий зазор δ , образованный между наружной цилиндрической поверхностью вала 2 и внутренней цилиндрической поверхностью полюсных приставок 3, на которых выполнены зубцы в форме прямоугольных трапеций. К внутренним торцевым поверхностям полюсных приставок примыкает постоянный магнит 4. В полюсных приставках выполнены пазы, в которых установлены шайбы 5 из немагнитопроводного материала, например, фторопласта. Величина зазора между валом и внутренними цилиндрическими поверхностями шайб составляет $\delta_{ш} = 0,05$ мм.

Для определения перепада давлений МЖГ, проведён расчёт распределения магнитной индукции в рабочем зазоре δ с использованием среды ELCUT. Размеры магнитной цепи МЖГ следующие: диаметр штока 80 мм,

$\delta = 0,15$ мм, $\delta_{ш} = 0,05$ мм, $t_1 = 0,3$ мм, $b_z = 3$ мм, $t_2 = 2$ мм, $\alpha = 45^\circ$. Марка магнитов: Ч-36Р с остаточной индукцией $B_r = 0,9$ Тл и коэрцитивной силой $H_c = 540$ кА/м. Материал магнитопровода – сталь 10, с индукцией насыщения 2,1 Тл в поле 50 кА/м. Намагниченность МЖ $M_{so} = 40$ кА/м. Критический перепад давлений единичного зубца определялся по зависимости:

$$\Delta P = M_{so} (B_{max} - B_{min}),$$

где B_{max} и B_{min} – максимальная и минимальная индукция под зубцом в Тл.

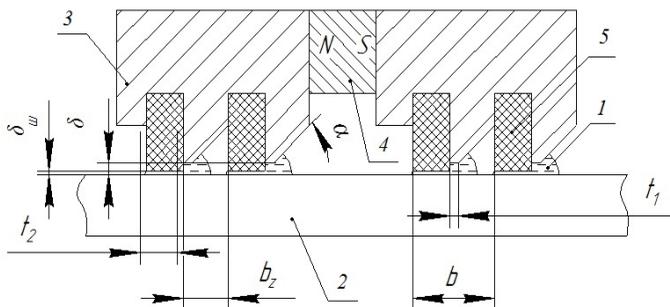


Рис. 1. МЖГ с газодинамическими сопротивлениями

Максимальная магнитная индукция под зубцом ограничивалась величиной 1 Тл. В ходе численных исследований были найдены размеры постоянного магнита, при этом его наружный диаметр составил 95 мм. Полученные результаты могут служить для разработки рекомендаций при проектировании аналогичных МЖГ для электротехнологических установок.

Библиографический список

1. **Магнитные жидкости** в ИГЭУ: тр. ИГЭУ / Под ред. Ю.Я. Щелькова, 2004. – 144 с.
2. **Чернышов Е.А** Специальные плавильные печи. Ч1: Электродуговые печи: учеб. пособие; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 253 с.

В.С. Баженов,
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА ДЛЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ВАЛОВ ЖИДКИХ СРЕД

К основным причинам сдерживающих внедрение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) для уплотнения вращающихся валов относятся: механическое взаимодействие МЖ с уплотняемой средой; гидродинами-

ческое взаимодействие МЖ, обусловленное переходом в турбулентный режим работы; химическое взаимодействие МЖ с уплотняемой средой, когда она является агрессивной.

Для герметизации вращающихся валов жидких сред разработана конструкция (рис. 1), отличительной особенностью которой является наличие дополнительного газового объёма, который обеспечивает защиту МЖ от непосредственного контакта с жидкой средой.

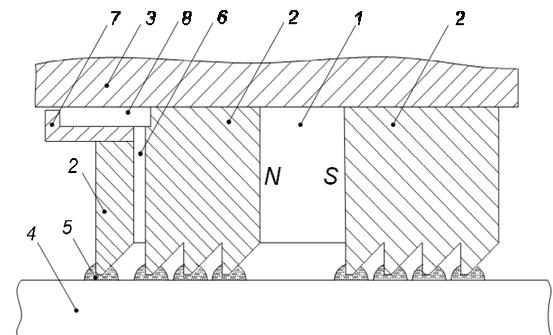


Рис. 1. Конструкция МЖГ для герметизации жидких сред горизонтально расположенных вращающихся валов: 1 – кольцевой постоянный магнит; 2 – полюсные приставки; 3 – корпус; 4 – вал; 5 – магнитная жидкость; 6 – радиальный канал; 7 – кольцевая цилиндрическая втулка Г-образного сечения; 8 – кольцевая полость

Это достигается выполнением в полюсной приставке между крайним зубцом, обращенным к жидкой уплотняемой среде, и последующим зубцом радиального канала.

Наличие газонаполненной полости исключает контакт уплотняемой жидкости с МЖ, расположенной под остальными зубцами. При этом зубец, обращенный к жидкой среде, работает без перепада давлений. Последующие зубцы удерживают перепад давлений газовых сред, что исключает перемешивание герметизируемой жидкой среды с МЖ.

О.В. Демиденко, асс.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

К ВОПРОСУ ПРОВЕДЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ

Некоторые электротехнологические установки требуют создания вакуума. Основным условием надёжной герметизации является отсутствие

утечек в герметизируемую среду, что привело бы к изменению химического состава газовой смеси, нарушению технологического цикла, браку продукции или аварии.

Данная работа направлена на разработку требований к проектированию конструкций магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) для электротехнологических установок, а также обоснованию выбора определённой марки магнитной жидкости (МЖ), и объёма её заправки в рабочем зазоре. С этой целью был разработан лабораторный стенд (рис1), представляющий собой макет узла МЖГ с магнитным узлом в виде однозубцовой полюсной приставки 1, магнитной системы и вала. Магнитная система состоит из магнитопроводного кольца 2, постоянного магнита 3, концентрически охватывающий вал 4. Скорость вращения вала составляет 0,4 м/с.

Герметичность замкнутого объёма 5 обеспечивает защитное МЖГ. Оно состоит из постоянного магнита 6, полюсных приставок 7,8 и удерживают большой критический перепад давления, чем однозубцовое уплотнение.

Разработанный стенд позволяет проводить как долгосрочные, так краткосрочные испытания МЖ при различном объёме заправки. При этом можно проводить оценку намагниченности МЖ, а также оценить ресурс её работы.

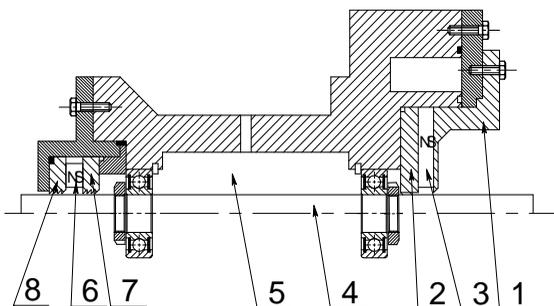


Рис. 1 Конструкция стенда магнитожидкостного герметизатора: 1 – однозубцовая полюсная приставка; 2 – магнитопроводное кольцо; 3,6 – постоянный магнит; 4 – вал; 5 – замкнутый объём; 7,8 — полюсные приставки

Библиографический список

1. Демиденко О.В. Разработка стенда для определения стабильности магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: двадцать первая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Т. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 167 с.

D.Y. Morozova, post-graduate;
M.S. Saikin, assistant professor, candidate of technical sciences,
M.V. Filatova, assistant professor, candidate of philological sciences
(ISPU, Ivanovo)

PHYSICAL EXPERIMENT TO DETERMINATE THE FORCE OF SUSPENSION OF MAGNETIC FLUID SENSOR ANGLE SENSITIVE ELEMENT

To receive a high precision of measurement of magnetic fluid sensor angle (MSFA) in control system of technical object, it's necessary to provide steady suspension its sensitive element inside of case. Algorithm of the estimation of suspension force of sensitive element and ratio between the sizes of the plug and magnet of the sensing element were received on the basis of calculation and computer simulation in the programs ELCUT and FEMM in the articles [1, 2].

Purpose of this work was experimental verification of the calculated value of magnitude of the suspension force of sensitive element of MSFA. The experiment was made for this purpose, in which distribution of a magnetic induction over the surface of sensing element MSFA was defined. The design of the measuring stand is presented in fig. 1.

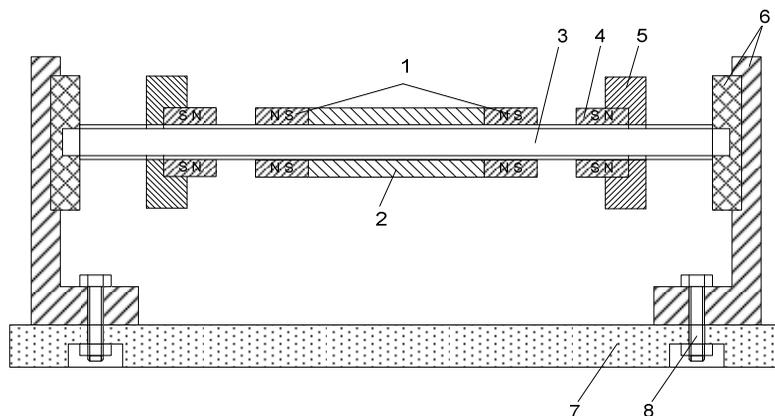


Fig. 1. Design of the measuring stand

Measuring stand is containing sensitive element consisting of two permanent magnets 1 and plug 2, which are adjusted on non-magnetic core 3; center-

ing magnet 4, which is adjusted in cover 5. Steady position of magnetic system is provided with a design 6,7,8.

Position of the sensitive element 1,2 was changed concerning the axis of symmetry during experiment, thus the value of magnetic induction over the surface of magnet was measured by means of a teslameter 47205/1 with a step 0,5 mm. The obtained data were substituted in algorithm of calculation for the determination the force of suspension of sensitive element in case of sensor.

Graphics of the force of sensing element suspension on its displacement relative to the symmetry axis of MSFA when magnetic induction was measured experimentally and with the help of using ELCUT program and FEMM which are presented on the fig. 2.

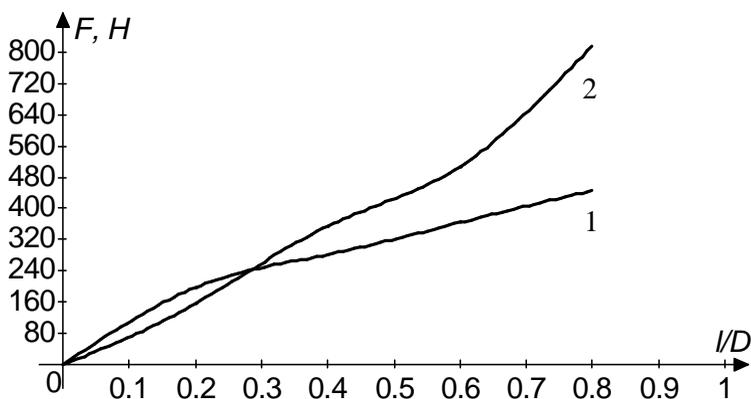


Fig. 2. The calculated and experimental (1,2) graph of the force of sensing element suspension of its position in case of MSFA

The obtained dependences allow us to conclude that in both cases the power of suspension is nonlinear. The difference between values of the suspension force was due to the size probe of teslameter. Probe has the dimensions of the same order as the step of the measurements of the induction along the end surface of the magnet sensor.

Bibliography

1. **Morozova D.Y.**, Saikin M.S. Calculated Definition of the Force of Suspension of Sensing Element of Magnetic Fluid Angle Sensor // Collection of research articles of the 16-th International Plyos Scientific Conference on nanodisperse magnetic fluids. 9 – 12 september 2014 / ISPU, 2014. – P. 292 – 298.

2. **Morozova D.Y.**, Saikin M.S. Magnetic fluid angle sensor for aircrafts // Bulletin RSATU № 2 (33) 2015 / Rybinsk, 2015. – P. 109 – 114.

И.Ю. Долгих, асп.;
рук. А.Н. Королёв, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ СТЫКОВОЙ СВАРКИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛОСКИХ ИНДУКТОРОВ

В настоящее время на производстве стыковая сварка является важным технологическим процессом, применяющимся для получения неразъёмных соединений труб, рельсов и других изделий. При этом используемые для её осуществления методы должны обеспечивать высокую производительность и стабильное качество сварного соединения. В этой связи среди широкого многообразия видов особое место занимает высокочастотная сварка, базирующаяся на использовании бесконтактной передачи энергии в требуемую область изделий с помощью индукционной катушки. Важным преимуществом использования индукционного токоподвода является возможность регулирования пространственного расположения и глубины нагреваемого в изделии слоя путём подбора соответствующих параметров индуктора, к которым относятся, прежде всего, его форма, а также частота и величина протекающего в нём тока.

Применительно к стыковой сварке актуальным является использование плоских индукторов, повторяющих форму поперечного сечения свариваемых изделий, что в конечном итоге позволяет повысить энергетическую эффективность процесса сварки, а также качество и надёжность сварных соединений за счёт уменьшения зоны неблагоприятного температурного воздействия [1]. Так, например, проведённое в программе полевого моделирования Comsol Multiphysics исследование [2] показало на существенные преимущества использования плоских индукторов по сравнению с применяемыми в настоящее время для тех же целей наружными при сварке изделий с большим поперечным сечением. В этом случае существенно меньшими оказываются значения температурного перепада в различных частях свариваемых поверхностей, время нагрева, затрачиваемая для его осуществления энергия, а также зона изделия по глубине, подвергающийся термическому влиянию (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик

Вид индуктора	Время нагрева, с	Температурный перепад, °С	Энергия, затрачиваемая на нагрев, Дж	Зона термического влияния, мм
Наружный	92	128	$9,8 \cdot 10^5$	47
Плоский	17	45	$4,1 \cdot 10^5$	20

В то же время для точного учёта всех технологических особенностей процесса сварки необходима детальная проработка как всего процесса в целом, так и отдельных его этапов. В этой связи одной из важных задач является выбор режима нагрева, характеризующегося заданным стабилизированным входным параметром. Для его исследования были разработаны математические модели, основанные на условной декомпозиции нагреваемого изделия на слои [3, 4]. При этом анализу были подвергнуты следующие режимы: стабилизация напряжения, тока и мощности в индукторе, а также тока и мощности в поверхностном слое, стабильный нагрев которого обуславливает получение качественного сварного соединения.

Проведённый анализ полученных результатов показал, что с энергетической точки зрения наилучшие показатели обеспечивает режим стабилизации тока в поверхностном слое. В этом случае наблюдается наибольшее значение технологического КПД процесса при наименьшем значении затрачиваемой на нагрев энергии. В то же время использование данного режима нагрева связано с повышенными требованиями к источнику питания, который должен обеспечивать широкий диапазон изменения напряжения, тока и мощности в индукторе, что обуславливает необходимость осуществления тщательного технико-экономического обоснования при выборе режима нагрева для сварки конкретного изделия.

В целом проведённые исследования показали на значительную перспективность использования плоских индукторов для осуществления стыковой сварки и актуальность дальнейшей работы в данном направлении.

Библиографический список

1. Патент 2558802 Российская Федерация МПК В 23 К 13/01. Способ индукционно-стыковой сварки профилей различной конфигурации / А.Н. Королёв, В.В. Тютиков, И.Ю. Долгих, А.С. Орлов; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.
2. Долгих И.Ю., Королёв А.Н. Использование плоских индукторов для стыковой сварки изделий больших сечений / Наука и инновации в технических университетах: материалы Девятого Всеросс. форума студентов, аспирантов и молодых учёных. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 95 – 96.
3. Долгих И.Ю., Королёв А.Н., Захаров В.М. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве / Вестник ИГЭУ. – 2014. – вып. 5. – С. 57 – 63.
4. Волков А.С., Долгих И.Ю. Разработка декомпозиционного метода исследования индукционно-стыковой сварки / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета. – 2015. – № 2 (33).

СЕКЦИЯ 16

ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Председатель – к.т.н., доцент **Макаров А.В.**
Секретарь – старший преподаватель **Зайцев Е.С.**

М.С. Пушкарева, Ю.С. Шибачев, студ.;
рук. Г.В. Чекан, ст. преп.,
М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Первый период реализации возможностей транспорта электрической энергии на расстояние связан с постоянным током. Опыты в этом направлении в России проводил петербургский военный инженер Ф.А. Пирочкин [1]. В 1876 г. он осуществил рекордную для того времени передачу энергии постоянным током на расстояние 3,5 км по рельсам Сестрорецкой железной дороги. Мощность передачи составляла несколько киловатт, а напряжение – сотни вольт.

В 1882 г. на Международной выставке в Мюнхене французский физик Марсель Депре [1] продемонстрировал действие передачи электроэнергии постоянным током от динамо-машины при напряжении 2 кВ на расстоянии 57 км по обычным телеграфным проводам.

Начиная с 1891 г. серьезную конкуренцию постоянному току составила система трехфазного переменного тока, разработанная русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским [1]. Пуск линии Лауфен – Франкфурт напряжением 15 кВ длиной 175 км положил начало эпохе трехфазного тока в технике передачи электрической энергии. Однако швейцарскому инженеру Тюри удалось создать удобную в эксплуатации систему передачи постоянного тока, которая работала при более высоком напряжении, чем линии постоянного тока прежних систем. Наиболее крупной из линий постоянного тока системы Тюри была передача между гидроэлектростанцией Мугье и г. Лион во Франции, введенная в эксплуатацию в 1906 г. После реконструкции в 1927 г. длина линии постоянного тока составила 260 км, напряжение 125 кВ, передаваемая мощность

19 МВт. Она была заменена трехфазной передачей переменного тока лишь в 1937 г.

С 1930-х годов развитие техники передачи постоянным током связано с применением выпрямленного тока, с использованием взамен динамомашин статических преобразователей (выпрямителей и инверторов) на базе дуговых и ртутных вентилей. В период с 1935 по 1945 гг. в США, Швейцарии, Германии и Швеции строятся несколько опытных линий электропередачи выпрямленным постоянным током.

В Советском Союзе уже в 30-х годах при планировании развития энергетики и создании объединенных энергосистем оценивалась возможность использования передач постоянного тока высокого напряжения (ППТ ВН), а также вставок постоянного тока (ВПТ) в качестве мощных межсистемных связей [2]. Наиболее значимые проекты представлены в табл. 1.

Таблица 1. ППТ ВН и ВПТ на территории России

№	Наименование	Год ввода	Мощность, МВт	Напряжение, кВ	Длина ВЛ (КЛ), км
1	Кашира – Москва	1950	30	±100	120
2	Волгоград – Донбасс	1962 – 1965	720	±400	473
3	Экибастуз – Центр (Тамбов)	1992 – 1995	6000	±750	2400
4	Выборгская ВПТ	1983 – 2002	1050/1400		–

В настоящее время единственный работающий объект – это Выборгская ВПТ является частью электропередачи 330/400 кВ, предназначенной для экспорта электроэнергии из России в Финляндию, энергосистемы которых работают несинхронно [2].

Основные преимущества и возможности ППТ ВН и ВПТ состоят в следующем [2]:

- обеспечивается надежная и экономичная передача электроэнергии по воздушным ЛЭП на дальние расстояния (до 3000 км);
- существенно упрощается передача электроэнергии в сложных условиях (подводные кабельные ЛЭП постоянного тока, глубокие вводы в мегаполисы);
- обеспечивается объединение систем, работающих асинхронно или с разными частотами (50 и 60 Гц);
- повышается статическая и динамическая устойчивость объединяемых энергосистем, исключаются системные аварии;
- ППТ предпочтительны для присоединения к энергосистемам генераторов с нестабильным уровнем генерации, зависящим от условий

окружающей среды (ветропарки, солнечные, приливные и другие установки генераторов).

С учетом большой протяженности территории России, а также неравномерного распределения энергоресурсов и промышленности, в ближайшие годы планируется строительство и ввод в эксплуатацию новых ВПТ и ППТ ВН с использованием современного оборудования.

Библиографический список

1. **Веселовский О.Н.**, Шнейберг Я.А. Очерки по истории электротехники. – М.: Изд-во МЭИ, 1993. – 252 с.

2. **Электрические** сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы. Том 3. Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: НТФ Энергопрогресс, 2012. – 367 с.

Е.Н. Туренкова, студ.;
рук. А.Н. Королев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г.Иваново)

ИСТОКИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Атмосферное электричество – совокупность электрических явлений в атмосфере, а также раздел физики атмосферы, изучающий эти явления.[1] Начиная научные исследования электричества, ученые поняли, что все таинственные огни (молнии) вызваны атмосферным электричеством. Облака во время грозы – плавающие в воздухе огромные электрические конденсаторы. Ослепительная молния, возникающая при слишком тесном сближении природных накопителей электроэнергии, наглядно показывает, как много электричества может быть в небе. Перед исследователями электричества открылись три пути: изучать атмосферное электричество, понять, как проходит электрический ток через живой организм, и простой, но зато более определенный путь экспериментов в лаборатории. Изучение грозного атмосферного электричества требовало отчаянной смелости, особенно в годы восемнадцатого столетия, когда не существовало ни измерительных приборов, ни изолированных проводов, ни представления о том, как электрический ток сделать безопасным.

Начало изучению атмосферного электричества было положено в XVIII веке американским учёным Бенджамином Франклином, экспериментально установившим электрическую природу молнии, и русским учёным Михаилом Ломоносовым – автором первой гипотезы, объясняющей электризацию грозных облаков [1]. Широко известен опыт Франк-

лина по выяснению электрической природы молнии. В 1752 году 15 июня в Филадельфии проведён эксперимент с использованием воздушного змея, запущенного в грозу. Опыт Франклина был описан в работе Джозефа Пристли «История и теперешнее состояние электричества». Франклин был изолирован в процессе эксперимента, чтобы избежать создания смертельно опасного контура протекания тока [2]. Франклин установил, что металлические острия, соединённые с землёй, снимают электрические заряды с заряженных тел даже без соприкосновения с ними.

Предлагалось немало идей для объяснения того, как формируется электрический заряд. Свою основную научную гипотезу в этой теории, являющейся и до сих пор, в основном, правильной, Франклин изложил в 1749 году в следующем виде [3]: «...Электрическая материя состоит из частиц крайне малых, способных пронизывать обычные вещества такие плотные, как металл, с такой лёгкостью и свободой, что они не испытывают заметного сопротивления». Сейчас эти «крайние малые частицы» мы называем элементарными частицами – электронами. Эта гипотеза исходила из материальной природы электричества.

Основной научной заслугой В. Франклина стало открытие им электрической природы веками наблюдаемого явления, называемого молнией. Поняв сущность мощного грозового электрического искрового разряда, сформулировал задачу: как можно эффективно бороться с разрушениями и пожарами, вызываемыми молнией? В 1750 году В. Франклин на основе результатов своих исследований в области искусственного и естественного электричества предложил изобретение – молниеотвод. Ввёл общепринятое теперь обозначение электрически заряженных состояний «+» и «-». В настоящее время молниеотвод Франклина в его различных модификациях – неотъемлемая часть практически всех зданий и сооружений.

В работах М.В. Ломоносова, посвящённых исследованию электричества особенно ценным является направленность их от качественных наблюдений к установлению количественных закономерностей – формированию основ теории электричества. Занимаясь независимо этими исследованиями, он с Г.В. Рихманом и Б. Франклином добились наиболее убедительных результатов. В ходе этих совместных с М.В. Ломоносовым исследований в 1745 году Г.В. Рихманом разработан первый электроизмерительный прибор экспериментального наблюдения – «электрический указатель», который, в отличие от уже использовавшегося электроскопа, был «снабжён деревянным квадрантом со градусной шкалой для измерения степени электричества» (Г.В. Рихман). «Грозовая машина», созданная ими, имела принципиальные различия с приборами других учёных, в том числе и с «электрическим змеем» Б. Франклина, давала возможность

стабильного наблюдения при любом изменении электричества, содержащегося в атмосфере при любой погоде.

Опыты В. Франклина, М. Ломоносова и Г. Рихмана по электричеству и их изобретения вызвали широкий международный резонанс и способствовали их признанию как крупных учёных, а так же дали толчок для дальнейших исследований в области электричества.

Библиографический список

1. **Википедия** – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – <http://wikipedia.org>. (дата обращения: 16.12.2015).
2. **Joseph Priestley** (Eds.). The History And Present State Of Electricity: With Original Experiments. Dodsley, Johnson and Davenport, Cadell, 1767.
3. **Капица П.Л.** Жизнь для науки. – М.: Знание, 1965. – 63 с.

И.В. Бобров, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Зачем инженеру знать историю электротехники? Многие задаются таким вопросом. Хотелось бы задать им встречный вопрос: можно ли представить хорошего музыканта, не знающего историю музыки или художника, не изучившего историю живописи? Наверное, это достаточно трудно. А инженер – это, в первую очередь, изобретатель. И историю ему нужно знать хотя бы для того, чтобы не изобретать велосипед.

В области электротехники большой интерес представляют исследования по использованию атмосферного электричества. Эта идея привлекает своей грандиозностью, однако молния интересна еще и по причине того, что она играет очень важную роль в структуре мироздания. Испарившаяся с поверхности земли вода охлаждается в атмосфере, и образуется пересыщенный пар. Капельки воды пребывают в состоянии тонкой взвеси до тех пор, пока электрические силы не заставят их соединиться в плотные массы облаков. Когда напряжение становится избыточным, происходят вспышки и в результате выпадают обильные дожди. Таким образом, молния поддерживает круговорот воды и, следовательно, саму жизнь. Конечно, нельзя утверждать, что если бы не молния, не было бы дождя. Однако то, что она является главной регулирующей силой, — достоверный факт.

Уже в XVII веке во многих странах велось исследование атмосферного электричества. В 1700 году лондонский аптекарь Самуэл Уолл заявил, что из натертого янтаря он извлек искру, которая похожа на молнию [1]. Но его слова были забыты. После Уолла сходство искры с грозовым разрядом отмечал не один ученый. Но никто не знал, как исследовать процесс, проходящий в облаках и чрезвычайно опасный для жизни экспериментатора. Ведь тогда у людей не было возможности добраться до грозовых туч. Более того, для определения электрического заряда использовалась пробка из бутылки, подвешенная на шелковой нити. Поднесенная к заряженному телу, она к нему притягивалась, а зарядившись – отталкивалась. Физики имели под рукой еще один прибор – лейденскую банку. Это был примитивный конденсатор. Вода, налитая в бутылку представляла собой одну из его обкладок с выводом контакта из горлышка. Другой обкладкой была ладонь исследователя. Силу электрического разряда экспериментатор проверял на себе.

Можно ли было браться за опаснейшие опыты с набором таких возможностей? Конечно, нет! Это мы видим на примере Михаила Васильевича Ломоносова и его друга Георга Рихмана. В 1752 году они совместно проводили исследования атмосферного электричества, с помощью изобретенного Рихманом электрического указателя – прообраза электрометра. У себя дома Георг Рихман устроил экспериментальную установку по изучению грозовых разрядов – «грозовую машину» [2]. Во время сильной грозы, когда ученый приблизился к электрометру «грозовой машины» на расстояние 30 см, неожиданно из толстого железного прута прямо в него ударил бледно-синий огненный шар величиной с кулак. Это была шаровая молния.

Как исследовать атмосферное электричество без опасности для жизни придумал в 1751 году американец Бенджамин Франклин. Чтобы попасть в облака он использовал бумажного змея. К мокрой льняной нити, на которой был запущен змей, Франклин поднес вывод лейденской банки и зарядил ее [3]. Заряд банки давал те же эффекты, что и электричество, полученное от трения. Используя натертый стеклянный шар и пробку на шелковой нити, ученый даже определил, что облака наэлектризованы в основном отрицательным зарядом. Опыты Франклина заложили фундамент для дальнейших исследований в этом направлении. Когда мы представляем себе молнию, то не можем не вспомнить этого великого человека, на чьем надгробии написано: «Он вырвал у неба молнию, и затем у тиранов – скипетры».

Нередко встречаются утверждения, будто то или иное открытие явилось делом случая, плодом «озарения» гениального ученого. Однако сле-

дует понимать, что без фундаментальных знаний и упорного труда открытие или изобретение сделать невозможно. Как говорят, «случай идет навстречу тому, кто к нему уже подготовлен».

Библиографический список

1. **Розенбергер Ф.** История физики. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1934. – 132 с.
2. **Цверва Г.К.** Георг Вильгельм Рихман, 1711 – 1753. – Л.: Наука, 1977. – 72 с.
3. **Франклин В.** Опыты и наблюдения над электричеством. – М.: АН СССР, 1956. – 260 с.

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

**ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ
И АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ЛОДЫГИН:
ИЗОБРЕТАТЕЛИ, ДАРИВШИЕ ЛЮДЯМ СВЕТ**

Проблема изучения истории электротехники в России была актуальна всегда. Все мы с самого детства слышим про лампу накаливания, изобретенную Томасом Эдисоном в 1879 году, про многофазные цепи, исследуемые Николой Теслой. И казалось бы: неужели все великие открытия и исследования в сфере электротехники принадлежат только иностранцам? Оказывается, нет. В данной работе мы рассмотрим вклад в развитие электрической техники двух российских ученых: П.Н. Яблочкова и А.Н. Лодыгина.

Основная цель данного доклада – показать, что российские исследователи могут занять достойное место в истории электротехники, что их исследования и идеи не прошли даром и живут поныне.

В связи с поставленной целью, хочется выделить следующие задачи. Нам необходимо: 1) перечислить основные изобретения П.Н. Яблочкова и А.Н. Лодыгина; 2) изучить историю и принцип работы «свечи Яблочкова» и лампы накаливания Лодыгина; 3) выделить новшества этих двух ученых в сфере электротехники, которые используются и в наше время; 4) сделать выводы.

Уже к началу XIX века были сделаны открытия, заложившие базис для науки, которую мы впоследствии назовем электротехникой. Так, например, в 1802 году наш соотечественник В.В. Петров установил, что при помощи электрической дуги «темный покой довольно ясно освещен быть может».

Активная деятельность П. Яблочкова и А. Лодыгина развернулась примерно в одно и то же время: во второй половине XIX века (тут даже стоит отметить, что год рождения у двух ученых был один и тот же – 1847-й).

Среди главных и наиболее известных в наше время изобретений П. Яблочкова можно выделить следующие: трансформатор переменного тока, электромагнит с плоской обмоткой, статические фазосдвигающие конденсаторы в цепи переменного тока, многофазные несвязные электрические цепи, электрическая свеча. Обратим свой взор на «свечу Яблочкова» (патент № 112024 от 23.03.1876).

Несмотря на всю свою революционность, данный прибор очень прост в исполнении. На асбестовую подставку устанавливаются два графитовых стержня, подсоединенные к электрической цепи. Между стержнями существует очень маленький зазор; в зонах, где контакт стержней недопустим, используется изоляция (в роли таковой может выступать либо тонкий слой гипса, либо тонкий слой слюды). На верхнем конце конструкции устанавливалась переключатель из тонкой проволоки, которая служила пусковым механизмом для поджигания дуги. Электрическая свеча помещалась в стеклянные шары и могла работать примерно 2 часа. Данное изобретение было по достоинству оценено современниками: после его демонстрации на Всемирной выставке в Париже в 1878 году «свечи Яблочкова» получили широкое распространение по всему миру. Первоначально ими был освещен Париж, затем – Лондон (появление «свечей» вызвало в Великобритании и во всем мире жёсткую дискуссию о целесообразности, безопасности и экономичности применения электроэнергии в быту); позже «подтянулись» и другие города: Берлин, Рим, Мехико, Филадельфия...

Да, слава «русских свечей» оказалась такой же недолгой, как и время работы одной «свечи». Но вместе с этим мы должны понимать, что именно благодаря П.Н. Яблочкову электрический свет был выведен из тесноты лабораторий на волю – на широкие улицы городов мира... Ведь последующие изобретатели электрических ламп (например, Т. Эдисон) ориентировались уже на массовое производство для массового использования электрического света.

Александр Николаевич Лодыгин известен у нас в стране и за рубежом прежде всего благодаря изобретению индукционной печи, лампы накаливания, своими разработками в сфере аэродинамики. Остановимся подробнее на «лампе Лодыгина» (патент № 1619 от 11.07.1874).

По своей конструкции и принципу работы «лампа Лодыгина» радикально отличалась от «свечи Яблочкова» и больше похожа на лампу накаливания современной конструкции. Первый образец лампы представлял собой стеклянную колбу, внутри которой на двух медных стержнях крепился стержень из ретортного угля. Впоследствии Александр Николаевич усовершенствовал конструкцию своей лампы: вместо угольного

стержня внутри колбы был помещен тончайшая проволока из железа, затем – из вольфрама. Для увеличения светового эффекта лампы он предложил закручивать вольфрамовую нить в спираль (подобная конструкция используется и поныне). Помимо этого, идея откачивать из колбы воздух для понижения реакционной способности элементов лампы, и, соответственно, для повышения её долговечности принадлежит именно Лодыгину.

Изобретение русского ученого могло бы найти должную поддержку и дальнейшее развитие у себя на родине, но, увы, инициативам Лодыгина не была оказана своевременная поддержка со стороны правительства. В 1884 году ученый эмигрирует в США, где уже вовсю со стороны промышленных магнатов оказывалась поддержка нововведениям Т. Эдисона. Однако, в 1890 году Лодыгин всё же получает патент на электрические лампы накаливания с металлической нитью. Но тяжелое финансовое положение вынудило изобретателя в 1906 году продать свой патент компании General Electric, в которую ранее вошел и концерн Т. Эдисона.

В истории не раз бывало, когда слава и доход доставались не гениальным изобретателям, а их более предприимчивым коллегам. Однако, хоть промышленное производство ламп накаливания и было организовано Т. Эдисоном, «пальма первенства» в их изобретении принадлежит нашему соотечественнику, Александру Николаевичу Лодыгину.

Таким образом, проанализировав деятельность только двух российских изобретателей, мы можем придти к важному выводу о том, что российские исследователи всё же оставили глубокий след в истории развития электротехники, заставили ускориться прогресс, дали путь для мыслей других великих ученых: Сименса, Жамена, Эдисона...

Библиографический список

1. **Википедия** – интернет-энциклопедия [электронный ресурс]. – <https://ru.wikipedia.org>.
2. **Основы теории цепей**: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке и др. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

СЕКЦИЯ 17

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Председатель – к.т.н., доцент Лапшин В.М.

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

Я.В. Панова;

рук. Ю.А. Секретарев, д.т.н., проф.

(НГТУ, г. Новосибирск)

ПОЛУЧЕНИЕ СИТУАЦИОННЫХ ОЦЕНОК ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОВ

Процесс ситуационного управления на ГЭС является основополагающим при работе всей станции в целом. Для оказания помощи дежурному персоналу в проведении такого управления, как и в случае превентивного управления, может служить *интеллектуальная система поддержки принятия решений*, или коротко СППР [3]. В основе СППР лежит *теория нечетких множеств*, одним из главных элементов которой является *нечеткий интервал* (рис. 1).

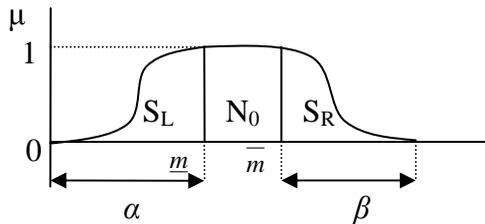


Рис. 1. Общий вид нечеткого интервала

Ключевой идеей СППР является использование нечеткого интервала в качестве инструмента для представления всех возможных значений параметров эксплуатационного состояния оборудования на станции, имеющих предупредительную сигнализацию. Исследования показали, что нечеткие интервалы параметров, относящихся к одной группе (в данном случае – к конкретному гидроагрегату) можно складывать между собой, получая тем самым *обобщенный интервал* [1].

Основываясь на этих выводах, была разработана модель получения ситуационных оценок гидроагрегатов. Модель представляет собой программу, реализованную в программной среде Math LAB Simulink, и имеет следующую последовательность расчета:

1. Определение «сработанных» защит (средства релейной защиты, у которых сработала предупредительная сигнализация), а также областей нечетких интервалов, в которых произошло срабатывание для каждой защиты гидроагрегата;
2. Построение обобщенных интервалов для каждого гидроагрегата;
3. Сравнение обобщенных интервалов всех гидроагрегатов с целью получения их *базовых оценок* [4];
4. Получение на основе обобщенных интервалов *текущих оценок* гидроагрегатов;
5. Получение *результатирующих оценок* эксплуатационного состояния гидроагрегатов [2].

Таким образом, на основании полученных результирующих оценок, дежурный персонал будет иметь возможность быстро оценить фактическое эксплуатационное состояние гидроагрегатов и сделать выводы об управляющих воздействиях на них.

Библиографический список

1. **Дюбуа Д.** Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. – М.: Радио и связь, 1990. – 322 с.
2. **Секретарев Ю.А.** Ситуационное управление составом гидроагрегатов на гидроэлектростанциях: монография / Ю.А. Секретарев, А.А. Жданович, К.Ю. Мосин. – Саяногорск; Черемушки: Сибирский федеральный ун-т; Саяно-Шушенский филиал, 2013. – 152 с.
3. **Панова Я.В.** Превентивное управление на ГЭС с позиции применения системы поддержки принятия решений // Энергия-2015: материалы 10 междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 т. – Иваново: Изд-во УИУНЛ ИГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 233 – 235.
4. **Панова Я.В.** Определение базовых оценок эксплуатационных параметров оборудования ГЭС // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. молодых ученых: в 11 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 5. – С. 90 – 95.

*А.Ю. Дьяков;
рук. Е.Ю. Затева, к.т.н., доц.
(СШФ СФУ, рп. Черемушки)*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СИБИРИ

В данной статье произведен анализ показателей баланса мощности единой энергетической системы (ЕЭС) России, и более подробно проана-

лизована объединённая энергетическая система (ОЭС) Сибири. Построена диаграмма мощностей Сибири, а также суточный график и интегральная кривая нагрузки. Обоснована нецелесообразность проектирования работы гидроэлектростанций в пиковой части нагрузки, разобраны проблемы, связанные с балансом мощности. Предложены возможные решения проблем в энергосистеме.

Единая энергетическая система России является высшей формой организации энергетического хозяйства страны.

На 2015 год ЕЭС России состоит из 7 объединённых энергосистем: Юга, Центра, Урала, Средней Волги, Северо-Запада, Сибири и Востока. Кроме внутренней системы, ЕЭС России осуществляет работу с энергосистемами других стран: ОЭС Казахстана, ОЭС Белоруссии, с энергосистемами Эстонии, Латвии, Грузии, Азербайджана, Литвы и Финляндии.

В электроэнергетический комплекс ЕЭС России входит 682 электростанции мощностью более 5 МВт, из них 106 гидроэлектростанций. Суммарная установленная мощность всех электростанций равна 230550 МВт. На долю ТЭС приходится 68,3 % (157601,87 МВт), АЭС – 11 % (25266 МВт), на ГЭС – 20,7 % (47684,43 МВт) около 52 % мощностей ГЭС располагается в Сибири. Максимум потребления за последнее десятилетие составляет 157425 МВт на 21.12.2012.

Сравнив установленные мощности и максимальное потребление, можно сказать, что около 32 % установленной мощности в ЕЭС не используется. Это связано с существованием таких резервов как: ремонтный, аварийный и нагрузочный. Так же существуют так называемые ограничения установленной мощности, связанные с различными факторами, например: нехватка угля на ТЭС, в маловодные годы ограничения регулирования водохранилища ГЭС. Если предположить, что ограничений нет, то большая часть мощностей не будет использоваться по той простой причине, что нет потребности в мощностях. Одна из причин избытка мощностей в России – гидроэлектростанции, а именно, их проектирование в пиковой части нагрузки, последнее в данной статье разобрано подробнее.

Библиографический список

1. Сайт системного оператора единой энергетической системы / <http://so-ups.ru/>.
2. **Гидроэлектростанции:** учеб. пособие / В.И. Брызгалов, Л.А. Гордон. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. – 541 с.
3. **Автоматизация** диспетчерского управления в электроэнергетике / под общ. ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 648 с.
4. **Энергетические** режимы электрических станций и электроэнергетических систем / Т.А. Филиппова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 298 с.

*Ш.М. Султонов, асп.,
М.Х. Назаров, магистрант;
рук. Ю.А. Секретарев, д.т.н., проф.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

КРАТКОСРОЧНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ГЭС ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА

Гидроэнергетика играет важную роль в структуре топливно-энергетического комплекса Таджикистана. Из общей установленной мощности энергосистемы Таджикистана, 96 % составляют мощности ГЭС. На них вырабатываются более 98 % электроэнергии в стране. Как известно, выработка электроэнергии на ГЭС зависит от стока воды в реках. В зимнем периоде, уровень воды снижается и ГЭС не могут вырабатывать необходимый объем электроэнергии для сохранения баланса в системе. Это приведет к дефициту электроэнергии в энергосистеме. Зимний дефицит электроэнергии составляет от 2,3 до 2,5 млрд. кВт·ч. В связи с этим в зимний период страна вынуждена вводить официальные ограничения на поставку электроэнергии [1]. Учитывая все это необходимо найти пути решения проблемы дефицита электроэнергии. Необходимо применить различные методы, которые позволяли бы оптимально использовать гидроэнергоресурсы и тем самым повысить выработку электроэнергии в стране в зимнем периоде.

Одним из способов уменьшения дефицита электроэнергии в Таджикистане является оптимизация режимов работы ГЭС в энергосистеме. Оптимизацию режимов ГЭС включает, оптимизацию долгосрочных режимов и краткосрочных режимов [2]. Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС энергосистемы Таджикистана приведена в работе [3]. В данной работе рассмотрено краткосрочная (суточная) оптимизация режимов ГЭС. Предлагается использовать метод равенства относительных приростов, для оптимизации суточных режимов работы ГЭС энергосистемы Таджикистана. Основными исходными данными при использовании данного метода являются характеристики относительных приростов (ХОП) всех ГЭС и определение заданного количества расхода воды W_{Qi} для каждой ГЭС. Критерий оптимального распределения нагрузки между станциями энергосистемы является равенства относительных приростов станций. Методика расчета сводится к подбору на каждой ГЭС коэффициента λ_i и решения системы уравнений (1) с последующей проверкой ограничений.

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{q_{1t}}{1 - \sigma_{1t}} = \lambda_2 \frac{q_{2t}}{1 - \sigma_{2t}} = \dots = \lambda_n \frac{q_{nt}}{1 - \sigma_{nt}} \\ P_{1t} + P_{2t} + \dots + P_{nt} = P_{nt} + \Delta P_{\Sigma t} \end{cases} \quad (1)$$

где λ_i – неопределенный множитель Лагранжа, величина которого подбирается так, чтобы обеспечить ограничение стока воды на i -й ГЭС;

$$q_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} - \text{относительный прирост расхода воды на } i\text{-й}; \quad \sigma_{ii} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma I}}{\partial P_i} -$$

относительный прирост потерь активной мощности.

Решение уравнения (1) показывает оптимальное распределение активной мощности между ГЭС. Для решения данной задачи была создана программа для оптимального распределения активной мощности между ГЭС на пакете программы Matcad, которое учитывает все ограничения по расходу воды, по выдаваемой мощности ГЭС и по балансу мощности в энергосистеме.

Таким образом, используя метод равенства относительных приростов для суточной оптимизации режимов работы ГЭС энергосистемы Таджикистана можно снизить дефицит электроэнергии в стране путем повышения выработки электроэнергии в энергосистеме. Краткосрочное оптимальное распределение позволяет повысить выработку электроэнергии в течение суток на 3 – 7 %. Работа является актуальной для Таджикистана. Внедрение этого метода в энергосистеме Таджикистана является своевременным и поможет решить ряд проблем, которые до сих пор ни нашли своё решение при управлении энергосистемой.

Библиографический список

1. **ОАХК** «Барки Точик», официальный сайт: [сайт]. URL: <http://www.barqitojik.tj/>.
2. **Гидроэнергетика**: учебное пособие / Т.А. Филиппова, М.Ш. Мисриханов, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. – 2-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 620 с.
3. **Секретарев Ю.А.** Повышение выработки электроэнергии в Таджикистане на основе оптимизации режимов ГЭС. / Ю.А. Секретарев, Ш.М. Султонов, В.Г. Шальнев // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 14 – 17.

В.В. Веселова, асп.;
рук. В.А. Шакиров, к.т.н., доц.
(БрГУ, г. Братск)

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ НА СЕВЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

В настоящее время многие перспективные для освоения районы Сибири не могут быть вовлечены в экономику страны из-за недостаточно развитой энергетической инфраструктуры. Одним из ярких примеров таких районов является север Забайкальского края. Данный регион имеет огромный потенциал в сфере минерально-сырьевой базы. На относитель-

но небольшой площади здесь выявлены месторождения медистых песчаников, медных сульфатов и титаномагнетитовых руд, железистых кварцитов, угля, сыныритов и других полезных ископаемых. Эти месторождения должны составить основу Удоканского территориально-производственного комплекса [1]. Удоканское месторождение является самым крупнейшим месторождением меди в России и одним из крупнейших месторождений в мире. Месторождение находится в Каларском районе Забайкальского края в 30 километрах от станции Новая Чара Байкало-Амурской магистрали.

Согласно Государственной программе Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона» в поселке Новая Чара Каларского района планируется не только строительство горнообогатительного комбината по разработке Удоканского месторождения, но и создание условий для полноценного, многогранного развития региона, уменьшения оттока населения и улучшения социальной сферы жизни. Для этого планируется произвести реконструкцию (расширение) железнодорожной станции «Новая Чара», реконструкцию участка железнодорожной линии «ст. Новая Чара – Чинейское месторождение», реконструкцию аэродромного комплекса, реконструкцию автомобильной дороги «Новая Чара – пос. Удокан», строительство и реконструкцию объектов инженерной инфраструктуры, объектов здравоохранения и объектов образования.

Согласно последним прогнозам для полноценного развития горнодобывающей промышленности в Каларском районе необходима мощность 600 МВт.

На данный момент существует несколько вариантов обеспечения такой мощности в районе:

1. Проект ОАО «Иркутскэнерго» строительства линии электропередачи (ЛЭП) 500кВ от проектируемой Ленской ТЭС в Усть-Куте до подстанции «Чара». Стоимость строительства с учетом перевода на номинальное напряжение 500 кВ линии от Усть-Илимска до Усть-Кута и прокладки еще одной линии 500 кВ от Братского переключательного пункта оценивается в 134 млрд. руб. ЛЭП обеспечит энергией разработку Чинейского полиметаллического месторождения и Удоканского месторождения меди в Забайкалье. Также будет решена проблема энергоснабжения Бодайбинского района Иркутской области и ряда территорий в соседних регионах.

2. Строительство крупного гидроузла на реке Витим суммарной мощностью 1410 МВт в составе: Мокской ГЭС мощностью 1200 МВт и Ивановского контррегулятора мощностью 210 МВт.

Согласно технико-экономическому обоснованию строительство данного гидроузла займет порядка 12 лет. Ориентировочная стоимость проекта 130 млрд. рублей.

3. Строительство локального энергетического комплекса на основе угольной ТЭЦ мощностью 600 МВт в Чарской долине.

Возможность строительства данного комплекса обусловлена наличием местных углей на территории Каларского района (Апсатское каменно-угольное месторождение). Ориентировочные сроки реализации проекта составляют порядка 5 лет, объем инвестиций – 31,5 млрд. руб.

Строительство локальной ТЭЦ позволит приблизить генерацию непосредственно к потребителям электрической и тепловой энергии.

Каждый из рассмотренных вариантов имеет преимущества и недостатки. Принятие решение по таким проблемам невозможно на основе лишь экономической оценки, поскольку каждый проект имеет определенные социальные, экологические воздействия, технические характеристики. Помимо многокритериальности, задача характеризуется такими признаками системных проблем, как неопределенность, неоднозначность, конфликтность, наличие риска [2]. Для принятия решений в таких условиях необходимо привлечение методов системного анализа, например методы многокритериальной теории полезности [3].

Библиографический список

1. Козловский Е.А. БАМ глазами геолога. – М.: Недра, 1986. – 204 с.
2. Новосельцев В.И. Теоретические основы системного анализа. – М.: Майор, 2006. – 592 с.
3. Кини Р. Размещение энергетических объектов: выбор решений. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

*A.S. Strakhov, Postgraduate;
adv. A.A. Prokhorova, PhD, Associate Professor,
A.A. Skorobogatov, PhD, Associate professor
(ISPU, Ivanovo)*

THE DEVELOPMENT OF HEALTH MONITORING TECHNIQUES OF THE INDUCTION MOTORS IN RUSSIA AND ABROAD

It is a well-known fact that the quantity of induction motors (IM) failures is about 30 % of the total electrical equipment failures. The right choice of health monitoring techniques of induction motors can extend their operational life and increase their reliability.

All types of faults of IM can be divided into two groups: the electrical and mechanical. Electrical faults are the faults due to the insulation breakdown, open circuit fault, broken rotor bars, and etc. Mechanical faults are the faults due to bearing fault, which leads to a dynamic and static imbalance of the rotor, load faults and others.

The objective of this paper is to study the methods of functional control of induction motors which are actively developed and used in Russia and abroad. The research is based on the thorough analysis of Russian and foreign literature and publications.

The careful examination of foreign literature has shown that the major attention is paid to the following methods of functional operational control of the induction motors as vibration monitoring [1] and motor current signature analysis (MCSA) [2]. Vibration monitoring is the most effective method of detection of mechanical faults of motor and MCSA – for electrical faults. Considerable attention is also paid to the acoustic monitoring of the insulation [3], thermal monitoring of the insulation and bearings [4] and partial discharge monitoring of the insulation [5]. There are many foreign publications about methods of detection of the induction motors electrical faults with the special analysis of the external magnetic field [6].

The vibration monitoring, MCSA and the analysis of the external magnetic field are closely connected with the spectrum for diagnostic signals, identifying diagnostic features of faults via the change in the magnitude of characteristic frequencies. For the proper work of these methods the accurate determination of magnitudes of these frequencies is required.

In the steady-state operation of the motor with a constant load, the Fast Fourier Transform can be used and the accuracy of the frequency calculation increases with the increasing signal recording time [7]. Since faults of the motor most often appear in transient conditions, such as the motor starting, recently new methods for determining the values of the characteristic frequencies have been developed, such as the Short-Time Fourier Transform [8], the wavelet transform [9] and compressed sensing [10]. These techniques allow to determine the magnitudes of the characteristic frequencies with high accuracy with low signal recording time. It will be noted that the vibration monitoring, MCSA and analysis of the external magnetic field with the application of the described signal processing techniques that require low signal recording time are under the special development and have no practical application at the moment.

Thus, comparing Russian and foreign publications, we can state that in Russian literature much attention is paid to the above-described monitoring techniques of the components of the induction motor with help of the characteristic frequencies, which are presented in the spectrum of the diagnostic signal. However, little attention is paid to the development of the signal processing techniques.

References

1. **Dorrell, D.G.** Analysis of Air Gap Flux, Current and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Air Gap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors

/ D.G. Dorrell, W.T. Thomson, S. Roach // IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting. – 1995. – Vol. 1. – Pp. 563 – 570.

2. **Thomson, W.T.** Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives - Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories / W. T. Thomson, R. J. Gilmore // Proceedings of 32nd Turbomachinery Symposium, Texas, A&M University. – 2003. – USA. – Pp. 145 – 156.

3. **Ellison, A.J.** Effects of Rotor Eccentricity on Acoustic Noise from Induction Machines / A.J. Ellison, S.J. Yang // Proc. of IEE. – 1971. – 118 (1). – Pp. 174 – 184.

4. **Milanfar, P.** Monitoring the Thermal Condition of Permanent-Magnet Synchronous Motors / P. Milanfar, J.H. Lang // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996. – Vol. 32. – No.4. – Pp. 1421 – 1429.

5. **Siddiqui, K. M.** Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor – A Review / K.M. Siddiqui, K. Sahay, V.K.Giri // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Vol. 3. – Issue 1. – Pp. 6549 – 6565.

6. **Henao, H.** A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor / H. Henao, C. Demian, G.-A. Capolino // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. . – Issue 5. – Pp. 1272 – 1279.

7. **Kliman, G.B.** Methods of Motor Current Signature Analysis / G.B. Kliman, J. Stein // Electric Machines and Power Systems. – 1992. – Vol. 20. – No.5. – Pp. 463 – 474.

8. **Pezzani, C.** Detecting Broken Rotor Bars With Zero-Setting Protection / C. Pezzani, P. Donolo, G. Bossio, M. Donolo // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50. – Issue 2. – Pp. 1373 – 1384.

9. **Chen, Z.** Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations / Pu Shi, Z. Chen, Y. Vagapov // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). – 2013. – Vol. 69. – No. 14. – Pp. 36 – 43.

10. **Tang, G.** Compressed sensing off the grid / G. Tang, B. Bhaskar, P. Shah and B. Recht // IEEE Transactions on Information Theory. – 2013. – Vol. 69. – Issue 11. – Pp. 7465 – 7490.

А.М. Сахаров, Н.С. Кофтаев, А.О. Назаров, студ.;
рук. О.Н. Калачева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Во время работы синхронного генератора его обмотки и активная сталь подвергаются нагреву.

Допустимые температуры нагрева обмоток статора и ротора зависят от температуры охлаждающей среды. Для изоляции класса «В» (на асфальтобитумных лаках) допустимая температура нагрева обмотки статора должна быть в пределах 105 °С, а ротора – 130 °С [1].

Для того чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, все генераторы выполняют с искусственным охлаждением.

Воздушное охлаждение. Наиболее распространенным методом охлаждения гидрогенераторов является замкнутая система косвенного охлаждения воздухом.

Охлаждение явнополюсных роторов облегчается из-за наличия межполюсных промежутков и большей площади охлаждения ротора.

Охлаждение гладкого ротора турбогенератора менее эффективно, так как в рассматриваемом случае он охлаждается только со стороны воздушного зазора. Это обстоятельство определяет ограниченные возможности воздушного охлаждения для турбогенераторов.

Косвенное водородное охлаждение. Водородное охлаждение эффективнее воздушного, так как водород как охлаждающий газ по сравнению с воздухом имеет ряд существенных преимуществ. Он имеет в 1,51 раза больший коэффициент теплопередачи, в 7 раз более высокую теплопроводность.

Отсутствие окисления изоляции в среде водорода по сравнению с воздушной средой повышает надежность работы генератора и увеличивает срок службы изоляции обмоток. К достоинствам водорода относится и то, что он не поддерживает горения, поэтому в таких генераторах можно отказаться от устройства пожаротушения.

Непосредственное водородное охлаждение. Еще больший эффект по сравнению с косвенным водородным охлаждением дает непосредственное охлаждение, когда водород подается внутрь полых проводников обмотки.

Генераторы с такой системой охлаждения на воздушном охлаждении работать не могут, т.к. обмотка, рассчитанная на форсированное охлаждение водородом, при работе на воздушном охлаждении перегреется и выйдет из строя. Поэтому при появлении больших утечек водорода из генератора, сопровождающихся глубоким и быстрым снижением давления водорода, генератор с непосредственным охлаждением должен быть аварийно разгружен и отключен от сети.

Непосредственное жидкостное охлаждение. При выполнении непосредственного жидкостного охлаждения генераторов в качестве охлаждающей жидкости применяют дистиллированную воду или масло, которые обладают более высокой теплоотводящей способностью по сравнению с водородом и позволяют еще больше увеличить мощности генераторов при сохранении их размеров.

Дистиллированная вода как охлаждающее вещество по сравнению с маслом имеет более высокие теплоотводящие свойства, лучшую пожаробезопасность.

Сравнительная эффективность различных способов охлаждения генераторов может быть показана путем сопоставления мощностей при одних и тех же габаритах генератора (табл. 1) [2].

Таблица 1. Эффективность различных систем охлаждения

Охлаждение генераторов	Увеличение мощности, о.е.
Воздушное	1
Косвенное водородное при избыточном давлении, МПа:	
0,005	1,25
0,2	1,7
Непосредственное (внутреннее) охлаждение статора и ротора водородом	2,7
Непосредственное охлаждение обмотки статора маслом и обмотки ротора водой	3,6
Непосредственное охлаждение обмоток статора и ротора водой	4

В табл. 1 показана эффективность использования воды для охлаждения активных элементов генератора. В полной мере эти преимущества реализованы в генераторах ТЗВ-800-2. В них водой охлаждаются не только обмотки, но и сталь статора и его конструкционные элементы. Здесь исчезает необходимость использования охлаждающего газа – водорода. Во избежание образования химически активного озона корпус генератора должен быть заполнен нейтральным азотом.

Дальнейшим шагом в направлении развития систем охлаждения является разработка криогенных генераторов с охлаждением жидким гелием.

Библиографический список

1. **ГОСТ 533-2000.** Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.

2. **Рожкова Л.Д.,** Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций: учеб. для техникумов. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1980. – 600 с.

*С.А. Наумов, М.Е. Любимова, Д.А. Перцев, студ.;
рук. А.В. Рассказчиков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВАКУУМНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ВРС-110

Находящиеся в эксплуатации морально и физически устаревшие выключатели создают много проблем. По данным РАО ЕЭС 15 % всех выключателей высокого напряжения не соответствуют условиям эксплуатации; износ подстанционного оборудования превышает 50 %. Более трети воздушных выключателей 330 – 750 кВ, составляющих основу коммута-

ционного оборудования межсистемных электросетей, имеет срок службы более 20 и даже 30 лет. Аналогичная ситуация с коммутационным оборудованием на напряжение 110 – 220 кВ.

Результатом этой работы стало создание в 2010 году первого вакуумного выключателя на напряжение 110 кВ с одним разрывом на фазу серии ВРС-110. Они производятся на Нижнетуринской производственной площадке концерна – «НТЭАЗ Электрик» и разработаны по техническому заданию ОАО «Тюменьэнерго» с учетом высокого коммутационного и механического ресурсов, минимальных эксплуатационных затрат, экологической безопасности, возможности работы в условиях низких температур.

Первый вакуумный выключатель ВРС-110 был смонтирован и запущен в ноябре 2010 в качестве секционного выключателя на ПС-318 «Возрождение» филиала ОАО «Ленэнерго».

Изоляция полюсов выполнена цельнолитой, кремнийорганической. Выключатели выпускаются с пружинным приводом. Выключатели типа ВРС-110 предназначены для коммутации электрических высоковольтных цепей при нормальных и аварийных режимах сетей трехфазного переменного тока с номинальным напряжением 110 кВ частотой 50 Гц с заземленной нейтралью с коэффициентом замыкания на землю 1,4 и применяются как комплектующие для открытых распределительных устройств 110 кВ комплектных трансформаторных подстанций КТПБР-110/35/10(6). Выключатели изготавливаются в сейсмостойком исполнении и предназначены для работы на высоте от 0 до 1,2 м при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) 9 баллов по шкале MSK-64, могут применяться также для расширения существующих подстанций и замены устаревших воздушных и других выключателей.

Основные преимущества перед элегазовыми выключателями: стабильное состояние контактной группы ВРС-110 сохраняется на протяжении всего срока эксплуатации, ресурс по механической стойкости ВРС-110 – 10 000 циклов, что в 2 раза больше, чем у элегазовых аппаратов; ВРС-110 не нуждаются в техническом обслуживании до истечения 10 000 коммутационных циклов; ВРС-110 являются экологически чистым и не требуют дополнительных затрат на утилизацию, как элегазовые выключатели; надежность выключателя ВРС-110 выше, чем у элегазового (дуогасительная часть ВРС-110 содержит меньше подвижных деталей).

Кроме того, конструкцией выключателей типа ВРС-110 обеспечивается: минимальные сроки и затраты на монтаж (6 – 8 часов); боковое размещение пружинного привода выключателей, обеспечивает хороший доступ к нему; цельнолитая кремнийорганическая изоляция полюсов значительно уменьшила массу и габариты, существенно повысила на-

СЕКЦИЯ 18

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

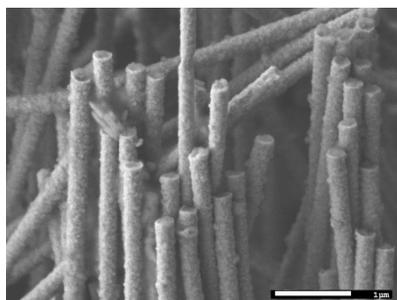
Председатель – к.т.н., доцент **Словесный С.А.**

Секретарь – ассистент **Шадриков Т.Е.**

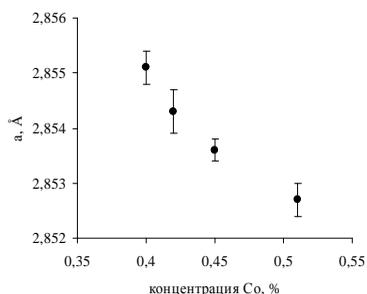
*А.Л. Козловский, PhD – докторант;
рук. К.К. Кадыржанов, д.ф.-м.н., проф.
(ЕНУ, Астана, Казахстан)*

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Fe/Co НАНОТРУБОК

Для получения металлических нанотрубок и нанопроволок удобно использовать метод темплатного синтеза. Главным достоинством данного метода является возможность контролировать скорость осаждения металлов в поры, путем изменения величины силы тока и приложенного напряжения, а так же временем осаждения. Для темплатного синтеза Fe/Co нанотрубок из растворов электролитов использовались трековые мембраны на основе ПЭТФ типа Hostaphan® производства фирмы «Mitsubishi Polyester Film» (Германия), облученные на ускорителе тяжелых ионов ДЦ – 60, толщиной 12 мкм, плотность пор $1.0E+09$ пор/см², диаметрами 110 нм. Темплатный синтез в треки шаблонной матрицы проводился при напряжении от 1,3 до 2,0 В в потенциостатическом режиме. РЭМ – изображение полученных нанотрубок представлены на рис. 1, а.



а)



б)

Рис. 1: а – РЭМ – изображение Fe/Co нанотрубок; б – зависимость параметра элементарной ячейки a для образцов Fe/Co нанотрубок

Для определения фазового состава Fe/Co нанотрубок было проведено рентгенодифрактометрическое исследование. В результате установлено, что исследуемые образцы однофазны, с ОЦК структурой с параметром кристаллической решетки отличающимся от эталонного значения. Поскольку полученное значение параметра оказалось несколько больше значения стандартного образца можно предположить, что наблюдаемая фаза является твердым раствором замещения кобальта в железе. График зависимости параметра элементарной ячейки от концентрации кобальта в нанотрубках приведен на рисунке 1, б. При аппроксимации полученной зависимости было обнаружено, что параметр элементарной ячейки уменьшается с увеличением концентрации кобальта практически по линейному закону с коэффициентом $da/dC = -0.0208 \pm 0.02 \text{ \AA}$. Очевидно, что такое уменьшение параметра элементарной ячейки связано с различием радиусов r атомов Fe и Co, которые равны: $r(\text{Fe}) = 1.227 \text{ \AA}$, $r(\text{Co}) = 1.191 \text{ \AA}$.

На рис. 2, а представлены графики вольтамперных характеристик исследуемых нанотрубок. Из графиков видно, что с увеличением концентрации Co в полученных нанотрубках угол наклона dI/dU возрастает.

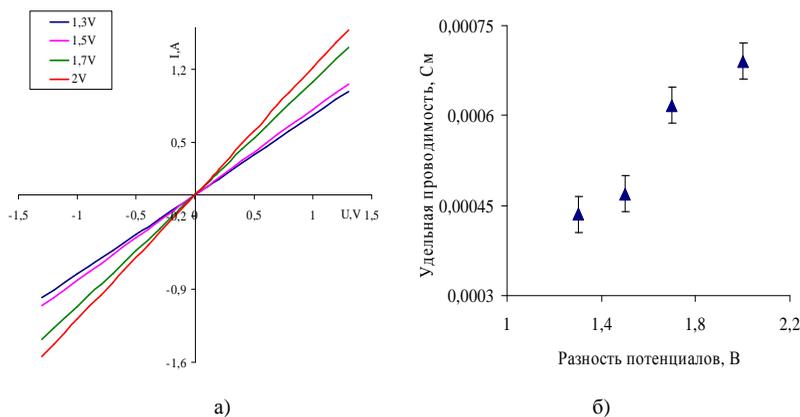


Рис. 2: а – графики ВАХ Fe/Co нанотрубок; б – график зависимости изменения проводимости от разности потенциалов Fe/Co нанотрубок

Результат изменения проводимости представлены на рис. 2, б. С увеличением разности потенциалов при темплатном синтезе Fe/Co нанотрубок, которая ведет к увеличению концентрации Co в наноструктурах удельная проводимость увеличивается.

И.С. Ерёменко, студ.;
рук. А.А. Мюльбаер
(НГТУ, г. Новосибирск)

ЭКРАНИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Подземные трубопроводы для транспортировки нефти и газа часто размещают в одном коридоре с воздушными высоковольтными линиями электропередачи переменного тока. Это дает много преимуществ как благодаря рациональному использованию земельных площадей, так и созданию условий для эффективного технического обслуживания, и эксплуатации наземных и подземных коммуникаций. Однако такое размещение трубопроводов имеет и отрицательные стороны. Электромагнитное переменное поле воздушных линий (ВЛ) может приводить к возникновению разности переменного напряжения между металлом трубопровода и грунтом.

Это может привести к:

- угрозе безопасности персонала (поражение электрическим током);
- возникновению электрокоррозии;
- повреждению электрических устройств, связанных с трубопроводом.

Для снижения данного влияния можно использовать экраны. Экранирование, проводится путём укладки заземлённого по концам изолированного проводника параллельно трубопроводу на участке сближения с ВЛ. Магнитное поле, вызванное протеканием тока по линиям ВЛ создаёт в экране продольную ЭДС, эта ЭДС создаёт ток, который в свою очередь создаёт магнитное поле обратное по направлению магнитному полю созданному току, протекающему в ВЛ. Тоже самое, происходит и с трубопроводом. Магнитное поле, созданное экраном, уменьшает наводимую ЭДС на трубопроводе.

Эффективность экранирования зависит от нескольких факторов: расстояние между экраном и трубопроводом и сопротивления контура, образованного при заземлении экрана. На рис. 1 представлены графики изменения наведенной продольной ЭДС на трубопровод ВЛ 110 кВ при перемещении заземленного экрана между ними, сопротивление заземления экрана 1, 5, 10, 20 Ом. Для расчета приняты следующие исходные данные: ВЛ выполнена на опорах П110-5В; ток в линии 100 А; участок сближения ВЛ с трубопроводом 1 км; расстояние от ВЛ до трубопровода 100 м; глубина заложения трубопровода 2 м; экран выполнен из провода АПВ 50.

Результирующая ЭДС в трубопроводе находится как геометрическая сумма ЭДС наведённой экраном на трубопровод и ЭДС наведённой в трубопроводе от ВЛ.

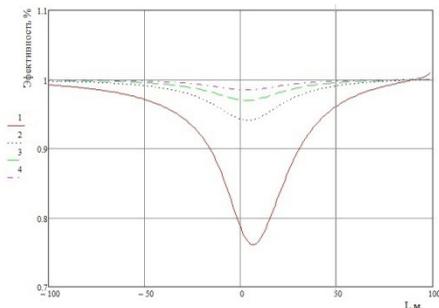


Рис. 1. Зависимость эффективности экрана от его расположения: 1 – сопротивления заземлителя 1 Ом; 2 – 5 Ом; 3 – 10 Ом; 4 – 20 Ом

Таблица 1. Влияние сопротивления заземляющего устройства на эффективность экрана

$R_z, \text{ Ом}$	%
1	24
5	6
10	3,2
20	2,6

Следовательно, для эффективного воздействия экрана на трубопровод, необходимо разместить его так, чтобы ток в экране был наибольший.

Из результатов, полученных выше можно сделать вывод, что максимальная эффективность экрана достигается при размещении экрана на расстоянии 7 м от опоры. А также видно, что чем ниже сопротивление контура, образованного экраном, тем выше его эффективность.

Библиографический список

1. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Связь, 1979. – 264 с.

А.С. Толопа, А.В. Кулешов, М.А. Устюжанин, студ.;
рук. А.А. Мюльбаер
(НГТУ, г. Новосибирск)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛПОВЫШАЮЩЕГО ТОКА ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПОДСТАНЦИЙ

Заземляющее устройство, используемое для заземления электроустановок одного или различных назначений и напряжений, должно удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к заземлению этих электроу-

тановок: защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции, условиям режимов работы сетей, защиты электрооборудования от перенапряжения и т.д. [1].

Одним из основных параметров заземляющего устройства (ЗУ) является напряжение на ЗУ при стекании с него тока замыкания на землю. Согласно правилам устройства электроустановок [1], напряжение на ЗУ, как правило, не должно превышать 10 кВ. Максимально возможное значение напряжения на заземляющем устройстве не может быть выше, чем произведение полного сопротивления заземляющего устройства на потенциалоповышающий ток. Потенциалоповышающим током называется ток, стекающий с ЗУ в грунт и следующий по земле к источникам питания. Этот ток создаёт электрическое поле в земле с различными потенциалами в различных точках, в том числе на элементах самого заземляющего устройства.

Потенциалоповышающий ток ЗУ при несимметричном коротком замыкании в электрической сети равен сумме натуральных значений токов нулевой последовательности всех линий, подходящих к электроустановке с рассчитываемым ЗУ, за вычетом токов, отводимых от ЗУ подсоединёнными к нему грозозащитными тросами ВЛ и оболочками кабелей [2]:

$$I_{\text{пп}} = \sum 3I_0 - \sum I_{\text{тр}}. \quad (1)$$

Одним из известных методических подходов определения токов в тросах и оболочках является разделение этих токов на две составляющие, одна из которых определяется проводимостью системы «трос – опоры», а другая – взаимоиндукцией между системой фазных проводов и тросом (оболочкой кабеля). В общем случае ток может отводиться от заземляющего устройства естественными заземлителями, выходящими за пределы подстанции, такими, как например, оболочки и экраны кабелей, трубопроводы и т.п.

Определение расчетным способом потенциалоповышающего тока достаточно сложно, а экспериментальное на реальном объекте – практически невозможно, т. к. необходимо измерение подтекающих и оттекающих токов по всем присоединениям с учетом их фазы при коротком замыкании (включая тросы ВЛ, оболочки кабелей и прочее).

Целью данной работы является разработка и изготовление экспериментальной установки по определению потенциалоповышающего тока заземляющего устройства подстанций. Основой разработанной и изготовленной установки являются 2 трехфазных трансформатора ТСЗИ-1,6 УХЛ2 с напряжением 380/127 В с обмотками, соединёнными в нулевую группу. Один трансформатор используется как модель трансформаторной подстанции, а второй – как источник питания среднего напряжения.

На данной установке моделируются короткие замыкания на землю как на самой подстанции (ток КЗ непосредственно вводится в ЗУ ПС), так и на подходящих ВЛ.

В установке заложена возможность изменять: место КЗ и значения токов КЗ; источник питания (питание происходит с высокой, низкой или с обеих сторон ПС); сопротивление системы «трос-опоры» подходящих ВЛ. Также в установке имеется возможность смоделировать кондуктивную составляющую тока, стекающего по заземляющему грозозащитному тросу и прочим коммуникациям. При моделировании измеряются с учетом фазы: токи КЗ; токи, подтекающие к месту КЗ по фазным проводам; ток в нейтрали; потенциалоповышающий ток; токи в заземленных тросах подходящих линий; напряжение на заземляющем устройстве ПС. Измерение осуществляется с помощью 16-тиканального АЦП (LCard E14-140M), который подключается к компьютеру и выводит значения с помощью пакета LabView.

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок. 7-е издание. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2015. – 704 с.
2. **Целебровский Ю.В.** Физико-технические основы надежности заземляющих систем: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1986 – 321 с.

*Д.А. Калугин, И.С. Кожуховский, А.А. Гераськин, магистранты;
рук. М.Ф. Носков, д.т.н.
(СШФ СФУ, п.г.т. Черёмушки)*

ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ОТКОЛА ОТ МОНОЛИТА И РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ ГЭС

При строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений зачастую существуют задачи откола от монолита и разрушения твердотельных крупногабаритных блоков естественного и искусственного происхождения – «негабаритов».

Наиболее эффективным, по нашему мнению, является электроразрядный способ, в котором применен пластичный материал [1] (пластилин, полиэтилен) с акустической жесткостью большей, чем у жидкостей и газов.

Суть метода [2], состоит в использовании энергии, выделяемой в плазменном канале электрического разряда при протекании через него мощного импульса тока. В разрушаемом блоке предварительно забурива-

ется шпур, в который помещаются электроды со сменным разрядным картриджем. После срабатывания коммутатора импульсного генератора происходит взрыв тонкого металлического проводника и последующий электрический пробой паров металла в твердотельном капилляре. В результате термического расширения формируемого плазменного канала происходит эффективное преобразование энергии мощного импульса тока в энергию ударных волн и быстро нарастающего импульса давления на стенки канала. Суммарное воздействие этих факторов ведет к зарождению и развитию системы радиальных трещин и, в конечном счете, разрушению образца.

Задачи разрушения негабаритов возникают при выемке котлованов под основные сооружения напорного фронта, при создании подземных гидротехнических сооружений (гидротехнические туннели, подземные гидроэлектростанции и т.п.), при ремонте или демонтаже бетонных массивов гидротехнических сооружений.

Разрушение негабаритов даст возможность снизить требования к производительности погрузочно-транспортного оборудования и технике, уменьшить количество рейсов при транспортировке горной породы и разрушенного бетона.

Традиционно в гидротехнических сооружениях для решения данного рода задач применяются взрывные и механические способы. Механические способы несут большие трудозатраты и малопроизводительны. При проведении буровзрывных работ основным недостатком для гидротехнических сооружений будет являться развитие естественных и образование новых искусственно созданных трещин. Увеличение количества и размеров трещин приведет к увеличению фильтрации, уменьшению сцепления подошвы плотины с основанием, снижению устойчивости плотины. Наибольшую опасность взрывной способ представляет при строительстве обводных каналов в берегах арочных плотин, так как арочные плотины воспринимают нагрузку от водохранилища и передают его в берега, а их ослабление может привести к разрушению самой плотины.

Альтернативным вариантом использования взрывного и механического способа является электроразрядный способ разрушения горных пород и бетона. Достоинствами способа являются отсутствие выделения вредных веществ, разрушительных акустических и сейсмических ударных волн, наличие контроля над процессом вложения энергии, отсутствию опасности для работающих поблизости людей и оборудования.

Мы считаем, что данный способ имеет перспективу применения в строительстве, демонтаже и ремонте гидротехнических сооружений. Учитывая основной недостаток, а именно малую мощность имеющихся

опытно-промышленных установок (63 кДж), необходимо создать специализированную установку с большим запасом энергии (порядка 250 кДж) и аperiodическим режимом выделения энергии. Такая установка заметно повысит производительность и позволит решать сразу несколько задач при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений ГЭС.

Библиографический список

1. Пат. Российской Федерации №2500889 / Лопатин В.В., Иванов Н.А., Юдин А.С., Жгун Д.В., Кузнецова Н.С., Правообладатель: Томский политехнический университет, Приоритет: 15.05.2012.

2. Шпуровое разрушение горных пород и бетона / Иванов Н.А., Пивоваров М.И., Войтенко Н.В., Юдин А.С. // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2 – С. 136 – 140.

3. **Burkin V.V.**, Kuznetsova N.S., Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids: I. Power characteristics of electro burst. – J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – Vol. 43. – Pp. 185 – 204.

*Н.В. Бойко, маг.;
рук. Н.Ф. Петрова, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СИЛОВОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ

Вакуумные выключатели в настоящее время являются приоритетно рекомендуемым коммутационным оборудованием для использования в сетях средних классов напряжения. Однако внедрение в их в практику электросетевого строительства связано с проблемами дополнительной защиты изоляции от высокочастотных (ВЧ) перенапряжений. От решения этих проблем зависит надежность эксплуатации некоторых типов электротехнического оборудования.

Прогресс в развитии полупроводниковой техники, в частности, создание новых классов силовых тиристоров, позволил приступить к разработке комбинированных выключателей, в которых параллельно традиционным контактам выключателей подключается блок силовых полупроводниковых приборов (СПП), принимающий на себя основную функцию по коммутации токов.

Высокочастотные перенапряжения, возникающие при повторных зажиганиях дуги в вакуумных выключателях, характеризующихся высокими частотами собственных колебаний, могут превысить уровень изоляции изношенного электрооборудования, в особенности витковой изоля-

ции вращающихся машин и трансформаторов. В этой связи целесообразно применение выключателей с бездуговой коммутацией, в которых исключается возможность генерации ВЧ перенапряжений.

В результате механического объединения контактных и бесконтактных коммутационных устройств в одной конструкции достигается сочетание преимуществ обоих типов аппаратов, и исключаются многие их недостатки.

Процесс отключения тока комбинированным выключателем протекает в два этапа. В течение первого этапа за счет схемных средств или воздействия на электрическую дугу осуществляется принудительный переход тока из контактной цепи в параллельно соединенную с ней полупроводниковую цепь. На втором этапе происходит прерывание тока полупроводниковой частью аппарата, которое осуществляется за счет изменения полярности напряжения источника питания, в результате чего к тиристорам прикладывается обратное напряжение, и они включаются.

Особенностью комбинированных выключателей является тот факт, что после перехода отключаемого тока через нулевое значение, через тиристоры некоторое время протекает обратный ток. Наличие остаточного тока приводит к утяжелению процесса восстановления напряжения.

Для сравнения в табл. 1 приведены рассчитанные скорости нарастания напряжения в вакуумном и комбинированном выключателях при отключении тока короткого замыкания $I_m = 25$ кА. Эффект du/dt в том, что если скорость нарастания напряжения в непроводящем состоянии будет больше некоторой критической, то произойдет открытие структуры.

Таблица 1. Характеристики процессов восстановления на контактах

Тип	ВВ	КВ
U_{max} , кВ	11	22
$\left. \frac{du}{dt} \right _{max}$, кВ/мкс	3,5	7,1
$\left. \frac{du}{dt} \right _{крит.}$, кВ/мкс	прим.	0,5; 1,0

В табл. 2 приведены рассчитанные скорости нарастания напряжения на выключателях при отключении заторможенных двигателей. Моделирование производилось при токе среза 5 А.

Таблица 2. Характеристики процессов восстановления на контактах

Тип	ВВ	КВ
$\left. \frac{du}{dt} \right _{max}$, кВ/мкс	0,03..0,1	0,05..0,2
$\left. \frac{du}{dt} \right _{крит.}$, кВ/мкс	прим.	0,5; 1,0

Примечание: За критическую скорость восстановления напряжения на контактах ВВ принимается скорость, при которой еще не возникают повторные зажигания дуги в ВДК.

Библиографический список

1. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М.И. Абрамович, В.М. Бабайлов, В.Е. Либер. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.

В.Е. Мещеряков, асп.;
С.Л. Шишигин, д.т.н., доц.
(ВоГУ, г. Вологда)

РАСЧЕТ ГРОЗОПОРАЖАЕМОСТИ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Среднегодовое число ударов молнии в наземный объект (грозопоражаемость) при заданной грозовой активности определяется надежностью молниезащиты и площадью стягивания молнии.

Современный подход к расчету грозопоражаемости базируется на методах имитационного моделирования. В большинстве случаев это трудоемкие методы, применимые для простейших объектов – линий электропередач и одиночных молниеотводов. В настоящей работе предлагается метод, пригодный для расчета грозопоражаемости сложных объектов, таких как электрические подстанции и нефтехранилища.

Будем считать, что усредненный лидер молнии движется по силовым линиям электрического поля, создаваемого зарядом грозового облака. Заряд лидера индуцирует на наземных объектах наведенный заряд, который искажает силовые линии и притягивает (стягивает) лидер к объекту. При достижении лидером зоны захвата с наземного объекта (включая молниеотводы) стартует встречный лидер, который замыкает лидер молнии на наземный объект. В работе исследуются различные критерии построения зоны захвата: из условия равной дистанции поражения как в МКС, из условия равного наведенного заряда [1, 2], из условия возникновения встречного лидера.

Пусть зона захвата построена. Объект считается защищенным с заданной надежностью, если расстояние от любой точки зоны захвата до молниеотводов меньше, чем до объекта. Зона защиты получается как совокупность точек, минимальное расстояние от каждой из которых до зоны захвата равно минимальному расстоянию до молниеотводов.

Для расчета площади стягивания из крайних точек зоны захвата строятся силовые линии до тех пор, пока сказывается влияние наведенного заряда объекта. Для стержневого молниеотвода достаточно одной сило-

вой линии. Ее максимальное горизонтальное отклонение от молниеотвода дает радиус стягивания молнии.

Уравнение силовой линии записывается в форме Коши и решается методом трапеций с автоматическим выбором шага [2]. Аналогично, решением задачи Коши рассчитываются линии, создающие каркас зоны захвата. Это обеспечивает высокое быстродействие по сравнению с существующими методами, где расчеты проводятся в узлах трехмерных ортогональных сеток.

Задачи имитационного моделирования молнии имеют специфику – необходимо выполнить расчеты электростатических полей при многократном изменении координат лидера молнии и неизменной геометрии объекта. Учет этой специфики заключается в блочной форме записи матричных уравнений, когда обращение блока матрицы потенциальных коэффициентов объекта производится один раз, что значительно повышает быстродействие [2].

Решены практические задачи по расчету зон защиты молниеотводов. К ним относятся зоны защиты одиночного, двойного и многократных молниеотводов, типового резервуара для нефти, резервуарного парка и электрической подстанции. Результаты сопоставляются с данными, установленными действующими российскими и международными стандартами по молниезащите.

Поиск закономерностей стягивания молнии к наземным объектам начинается с модельной задачи об искажении внешнего электростатического поля заряженной сферой. Установлено, что чем меньше объект искажает внешнее поле, тем меньше площадь стягивания. Наведенный заряд невысоких объектов компенсируется зеркальным зарядом, поэтому эти объекты также мало стягивают молнию. Наведенный заряд высотного объекта существенно искажает внешнее поле, поэтому стягивает молнии с большой площади еще до возникновения встречного лидера.

Исследовано влияние высоты и поперечного сечения наземного объекта, тока молнии и рельефа местности. Результаты сравнились с данными стандарта МЭК, РД 153-34.3-35.125-99 (далее РД-99), а также результатами других исследователей. Полагаем, что данные РД-99, где радиус стягивания молниеотвода R_a возрастает не быстрее, чем $h^{0.5}$, точнее, чем данные МЭК, где $R_a = 3h$. От коэффициентов C_d , учитывающих окружение объекта в стандарте МЭК, можно отказаться при использовании современного программного обеспечения.

Библиографический список

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. – СПб. Изд-во Политехн. ун-та. 2007. – 280 с.
2. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е., Шишигин Д.С. Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда // Электричество. – 2015. – № 8. – С. 4 – 9.

М.С. Наталич, студ.;
рук. В.Е. Качесов, д.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЛ В ЗОНЕ ПОЛЕТА БПЛА

Значительная протяженность ВЛ ВН и СВН требует диагностирования их изоляции. В настоящее время это возможно с помощью средств малой авиации или беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Существующие БПЛА управляются посредством GPS – навигации, при этом точность позиционирования летательного аппарата ограничена, кроме того, возможно его падение в силу помех, создаваемых ЛЭП. Для надежного и точного диагностирования с помощью БПЛА предлагается использовать электрическое поле (ЭП), создаваемое самой ЛЭП [1]. При облете ЛЭП возникают ситуации которые искажают её электрическое поле – это пилотирование вблизи опоры, а также порослей и деревьев. Сам БПЛА так же искажает ЭП.

Существующие коммерческие программы расчета ориентированы, главным образом, на расчет стационарного ЭП, в то время как ЭП нестационарно при ОАПВ или ТАПВ. В предложенном методе расчет ЭП, по сути, сводится к расчету электрической цепи, в остальной части которой могут моделироваться сами переходные воздействия.

Суть метода расчета ЭП состоит в расчете электрических потенциалов вблизи заряженных проводов ЛЭП. Для этого пространство условно разрезается на кубы у которых удалены ребра, а грани образуют систему емкостей. Принципиально в качестве кубика могут выступать элементы с комплексной проводимостью. Пример разбиения пространства на кубики и соответствующая электрическая схема показаны на рис. 1. При формировании электрической схемы учитываются граничные условия: в рамках поставленной задачи предполагается, что пространство ограничено сверху, справа слева, а внизу имеет нулевой потенциал.

После нумерации узлов во всех направлениях (x, y, z) формируется матрица узловых проводимостей \mathbf{Y} . Искомые узловые напряжения/потенциалы (\mathbf{U}) получаются путем решения системы линейных алгебраических уравнений с сильно матрицей \mathbf{Y} :

$$\mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{I},$$

где \mathbf{I} – матрица токов, обусловленная фазными источниками напряжения.

Программно метод реализован на языке Фортран-95.

При равномерной сетке разбиения пространства порядок решаемой системы уравнений значителен, поэтому принята неравномерная сетка

разбиения пространства, которая позволяет заметно сократить требования к памяти ЭВМ и ускорить расчет.

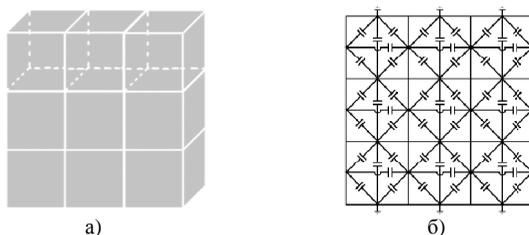


Рис. 1 Пример разбиения пространства (а) и электрическая схема (б)

Для проверки работоспособности методики расчета ЭП с неравномерной сеткой разбиения (в 2D-пространстве) была составлена упрощенная электрическая схема в программе PSpice. Часть схемы представлена на рис. 2, где цветом отмечена часть фазного провода. С помощью такой модели получено распределение потенциалов под фазным проводом (рис. 2, б). Ввиду грубости сетки имеет место погрешность, уменьшаемая более плотной сеткой разбиения и увеличением моделируемого пространства.

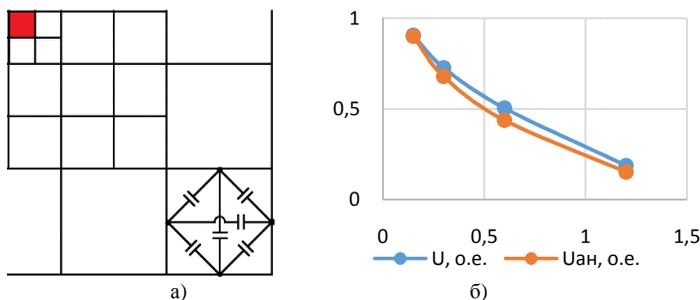


Рис. 2 Неравномерная сетка разбиения в 2D-пространстве и результаты расчетов

Выводы. Разработан метод расчета ЭП, который легко сопрягается с программами расчета электрических цепей. Проверена работоспособность предложенного способа на равномерной и неравномерной сетках разбиения пространства вблизи ВЛ.

Библиографический список

1. Пат. РФ № 2421746 (от 20.06.2011), МПК G01R31/08. Способ диагностики высоковольтной линии электропередачи / В.Е. Качесов, Д.Е. Лебедев // 2011. – БИ № 17.

*А.А. Федюкова, магистр.;
рук. Ю.А. Лавров, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К УЛЬТРАКОМПАКТНЫМ ВОЗДУШНЫМ ЛИНИЯМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время проблемы недостаточной пропускной способности, негативного экологического воздействия, больших значений охранных зон и относительно высокой стоимости строительства воздушных линий электропередачи высокого напряжения становятся всё более актуальными. Одним из наиболее эффективных способов решения всех этих проблем является применение ультракомпактных воздушных линий (УКВЛ) напряжением 35, 110 и 220 кВ.

Значительные преимущества в массогабаритных показателях УКВЛ дает применение узкобазовых опор: масса опоры снижается более, чем в два раза (с 4880 до 2292 кг для одноцепной опоры ВЛ напряжением 110 кВ), расстояние между крайними точками подвеса проводов для решетчатой опоры башенного типа составляет 10 м, для узкобазовой – 6,6 м [1]. Малая площадь под опорой, невысокие затраты на строительство фундаментов, простое закрепление фундаментов в слабых и болотистых грунтах, хорошая вандалоустойчивость также являются преимуществом опоро нового типа.

Еще одним техническим решением, применяемым при проектировании компактных воздушных линий, является замена неизолированных сталеалюминевых проводов на самонесущие изолированные провода. Применение СИП уменьшает вероятность аварий, вызванных образованием гололеда и падением деревьев на провода. Помимо этого СИП позволяет уменьшить величину охранных зон с 20 до 5,5 м для ВЛ напряжением 110 кВ и с 25 до 5,5 м для ВЛ напряжением 220 кВ [2].

Значительно компактизировать канал передачи электроэнергии позволяет применение изолирующих траверс (ИТ). За счет уменьшения межфазных габаритов уменьшается площадь, отводимая под зоны отчуждения ВЛ, снижается электромагнитный фон вдоль трассы линии и значительно увеличивается её пропускная способность. Для линии напряжением 110 кВ величина натуральной мощности почти в 3,5 раза превосходит аналогичный показатель традиционной двухцепной ВЛ-110 кВ на унифицированных опорах [3].

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик воздушной линии является её грозоупорность. Сооружение УКВЛ предусматривает

установку линейных защитных аппаратов. Эффективность их применения зависит от многих факторов. Расчеты удельной энергии, выделяемой в ЛЗА, показывают, что применение ОПН на ВЛ наиболее эффективно в следующих случаях: при высоком сопротивлении заземления опор; на ВЛ, проходящих по районам с неблагоприятными климатическими условиями, препятствующими использованию грозозащитных тросов; на ВЛ с ослабленной изоляцией; на высоких опорах; на ВЛ, проходящих по району с повышенной грозопоражаемостью; на одной из цепей двухцепной ВЛ, что практически полностью предотвращает грозовые отключения одновременно двух цепей.

Все рассмотренные преимущества ультракомпактных воздушных линий позволяют считать УКВЛ одним из перспективных инновационных направлений развития в области передачи электроэнергии.

Библиографический список

1. **Повышение** пропускной способности и управляемости электропередач переменного тока / Постолатий В.М., Быкова Е.В., Тимашова Л.В., Шакарян Ю.Г. // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – № 18. – С. 86 – 92.

2. **Зеличенко А.С.**, Смирнов Б.И. Устройство, эксплуатация и ремонт воздушных линий электропередачи. – М.: Высшая школа, 1970. – 261 с.

3. **Постановление** Правительства РФ № 160 «О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон» – Введ. 24.02.2009 – [Электронный ресурс] – дата публикации в Интернет: 17.09.2013. – URL:http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/54/54886/.

*Я.Р. Чесалина, студ.;
рук. И.А. Лебедев, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СУХИХ КОНЦЕВЫХ МУФТ 110 КВ

В настоящее время в электроэнергетике внедряется оборудование нового поколения, обладающее рядом особенностей и преимуществ по сравнению с имеющимся в эксплуатации оборудованием. К такому оборудованию относятся кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые за последние десятилетия широко используются в России.

Существует несколько основных причин, по которым кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена вытесняют другие типы кабелей:

– высокая пропускная способность;

- высокая надежность при квалифицированном проектировании и монтаже кабеля;
- низкие затраты на реконструкцию и содержание кабельных линий;
- технологичность монтажа кабеля, в т.ч. отсутствие ограничений прокладки на разноуровневых площадках.

Создание силовых электрических сетей и последующий процесс подключения к ним различного оборудования сопровождается применением специальной электротехнической арматуры для кабелей – муфт. В работе речь идет о концевых кабельных муфтах, служащие для соединения кабельных линий с воздушными линиями.

На данный момент существует два вида концевых муфт – маслonaполненные и сухие муфты. Маслonaполненные концевые муфты применяются в большинстве случаев, но существует ряд недостатков, которые ограничивают их применение и требуют дополнительные затраты на организацию рабочего места, эксплуатацию и монтаж. Таким образом, Из-за ряда недостатков маслonaполненных муфт производится переход на муфты с сухой изоляцией, где в качестве изоляционного материала используется силикон. Стоит отметить, что на данный момент в России нет производства сухих концевых муфт и поставщиками данного оборудования являются зарубежные производители.

Сухие муфты имеют ряд преимуществ перед маслonaполненными: в конструкции муфты для внутренней изоляции вместо изоляционной жидкости используется предъизготовленная на заводе конструкция из силиконовой резины. За счет отказа от изоляционной жидкости удается снизить массогабаритные показатели, повысить скорость монтажа и надежность эксплуатации, а также расширить температурный диапазон применения муфт (сухие муфты имеют более широкий температурный диапазон (до $-55\dots-60^{\circ}\text{C}$ против $-40\dots-50^{\circ}\text{C}$), могут быть установлены в любом положении (ограничение по отклонению от вертикальной оси у маслonaполненных – не более $30\dots45^{\circ}$).

Взяв за основу работающую в действительности маслonaполненную концевую муфту 110 кВ сечением жилы 2500 мм^2 производства компании *SUDkabel* и проанализировав значения напряженностей электрического поля в «критических» (ключевых) точках, выполнена оптимизация конструкции муфты и получен конечный вариант сухой муфты, где вместо изоляционной жидкости используется изоляционный силикон. Получившиеся электрические и массогабаритные характеристики сухой муфты ничем не уступают характеристикам маслonaполненной муфты и сопоставимы с зарубежными аналогами сухих концевых муфт.

Ценность работы заключается в следующем:

– разработанная модель сухой концевой муфты позволяет оценить значения напряженности электрического поля в «критических» (ключевых) точках;

– получены сравнительные характеристики сухой и маслонаполненной концевых муфт и результаты расчетов напряженностей электрического поля, на основании которых можно делать выводы о целесообразности перехода от маслонаполненных муфт на муфты с сухой изоляцией.

На основании полученных результатов возможно разработать сухую концевую муфту на напряжение 110 кВ и потребителями продукта могут являться действующие объекты и энергосистемы: ПАО «Россети», ПАО «ФСК ЕЭС», а также иные электроэнергетические сети.

Библиографический список

1. **Электрические** кабели, провода и шнуры: (справочник) / Д.С. Бачелис, Н.И. Белорусов, А.Е. Саакян; под общ. ред. Н.И. Белорусова. – 2-е изд., перераб. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 608 с.

2. **Раздел I.** Первичное оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ОАО «Россети» на 29.05.2015.

Д.Ю. Лосев, студ.;
рук. О.Т. Хасанова, ст. преп.
(ТГТУ, г. Ташкент)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Электромагнитные поля промышленной частоты (ЭМП ПЧ) являются частью сверхнизко-частотного диапазона радиочастотного спектра, наиболее распространенной как в производственных условиях, так и в быту, диапазон ПЧ которого равен 50 Гц.

Источниками ЭМП ПЧ являются системы передачи и распределения электроэнергии, такие как электростанции, трансформаторные подстанции, линии электропередачи, электросети административных зданий, а также электрооборудование и электропроводка производственного оборудования [1].

Пребывание человека в электромагнитных полях может приводить к общим нарушениям здоровья, особенно под влиянием полей высоких и сверхвысоких частот. При интенсивном воздействии электромагнитного поля на экспериментальных животных выявлено резкое учащение дыхания, нарушение сердечного ритма, повышение артериального давления, общие судороги.

На сегодняшний день разработаны гигиенические нормативы для электростатических полей, электрических полей диапазона частот 1–12 кГц и магнитных полей промышленной частоты.

К основным методам защиты от электромагнитных излучений относятся [2]:

- рациональное размещение излучающих и облучаемых объектов, исключающее или ослабляющее воздействие излучения на персонал;
- ограничение места и времени нахождения работающих в электромагнитном поле;
- защита расстоянием;
- уменьшение мощности источника излучений;
- использование поглощающих или отражающих экранов;
- применение средств индивидуальной защиты и др.

Электрические поля промышленной частоты нормируются в соответствии с ГОСТом 12.1.002-84 «Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряжения и требования к проведению контроля на рабочих местах». В соответствии с этим нормативным документом предельно допустимый уровень напряженности электрического поля (E) составляет 25000 В/м.

Допустимое время пребывания в электрическом поле напряженностью свыше 5 до 20 кВ/м включительно определяется по формуле:

$$T = \frac{50}{E} - 2, \quad (1)$$

где T – допустимое время пребывания в электрическом поле при соответствующем уровне напряженности, ч; E – напряженность воздействующего электрического поля в контролируемой зоне, кВ/м.

Ниже на рисунке один приведена зависимость $T = f(E)$, определенная расчетным путём по формуле (1).

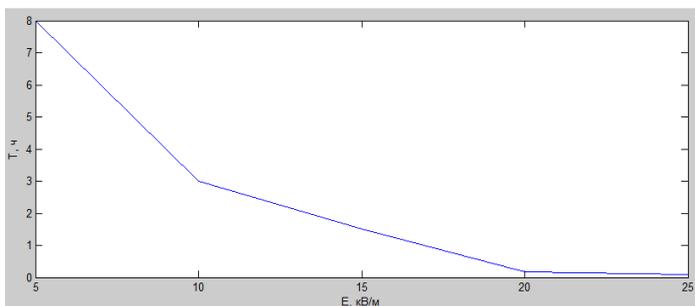


Рис. 1. Характеристика зависимости допустимого времени пребывания в электрическое поле от напряженности

Таким образом, из приведённой характеристики можно сделать выводы, что при уровне напряжённости ЭП, не превышающем 5 кВ/м, пребывание персонала в ЭП разрешается в течение всего рабочего дня, состоящего из 8 часов. Кроме этого, допустимое время пребывания в электрическом поле имеет право быть реализовано однократно или по частям в течение рабочего дня, а в остальное рабочее время необходимо использовать средства защиты от электромагнитного поля или находиться в ЭП напряжённостью до 5 кВ/м.

Библиографический список

1. **Манойлов В.Е.** Основы электробезопасности. – Л.: Энергия, 1976. – 344 с.
2. **Емельянов В.А.** Мероприятия по защите населения и территорий в условиях электромагнитного загрязнения окружающей среды // Основы безопасности жизнедеятельности. – 2000. – №1. – С. 58 – 61.

Д.А. Какурин, студ.;
рук. Р.А. Войтович, к.т.н.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОДНОПРОВОДНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ТЕСЛА

В связи с постоянно возрастающими требованиями повышения эффективности перед энергетической промышленностью стоит задача разработки и внедрения новых, более экономичных, технологий. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы может стать, разработанная еще Н. Тесла, однопроводная линия. Главным ее преимуществом является отсутствие активных потерь в проводнике, т.е. пропадает необходимость использовать мощные кабельные и воздушные линии. В качестве проводника здесь используется провод, сечение которого выбирается только из условий механической прочности.

Принципиальная схема резонансной электропередачи представлена на рис. 1.

Электрическая энергия от источника энергии (1) через высоковольтный высокочастотный трансформатор Тесла (2) подается на проводящий канал (3). Высоковольтный высокочастотный трансформатор Тесла (2) генерирует в проводящем канале электромагнитные колебания реактивного емкостного зарядного тока и электрического поля.

Реактивный ток является током зарядки собственной емкости проводящего канала (3) по отношению к земле, то есть током смещения, который, в отличие от тока проводимости не создает резистивных активных

потерь мощности на сопротивлении линии. Джоулевы потери от тока проводимости равны нулю, так как линия разомкнута.

Проведенные на настоящий момент исследования показали принципиальную возможность данного способа электропередачи [1, 2]. Если в дальнейшем будет доказана высокая эффективность и безопасность однопроводной линии, то перспективы ее использования невозможно переоценить.

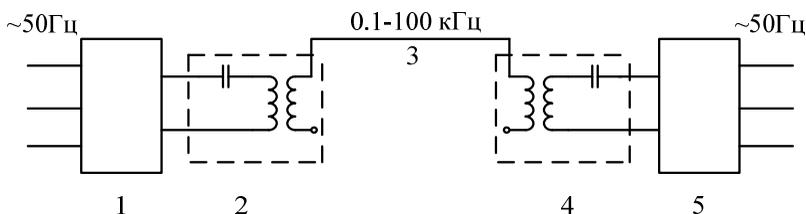


Рис. 1. Принципиальная схема однопроводной системы передачи электрической энергии

Перед внедрением необходимо провести исследования в областях электромагнитной совместимости, надежности, а так же разработать адекватную математическую модель. В настоящее время можно предположить, что возможность использования этого метода будет ограничена, т.к. в основе метода лежит передача на высоких частотах и при высоких значениях напряженности электрического поля, поэтому использование воздушных линий может вызвать проблемы электромагнитной совместимости с техно- и биосферой.

Библиографический список

1. **Кадомская К.П.**, Кандаков С.А., Лебедев Д.М. Об однопроводной системе передачи силовой электрической энергии. Новосибирск, НГТУ. – 2011. – 12 с.
2. **Стребков Д.С.**, Некрасов А.И. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. – М., ВИЭСХ. – 2008. – 351 с.

А.В. Яблонский, студ.;
рук. С.С. Шевченко, ст. преп.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОД ВОЗДУШНОЙ ЛИНИЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Для обеспечения потребителей качественной электроэнергией нужно своевременно отслеживать режим работы ВЛ. Существующие методы мониторинга имеют существенные недостатки: у контактных методов это

установка на проводники под нагрузкой, сложные математические модели, высокая стоимость и т.д. Бесконтактная технология мониторинга под нагрузкой, основанная на измерении магнитного поля ВЛ высокого напряжения, лишена данных недостатков.

Следует отметить, что ее основное достоинство – это простота и дешевизна, поскольку измерение может быть реализовано дешевыми и энергоэффективными магнитными сенсорами.

Для оценки идеи проведем ее моделирование в COMSOL Multiphysics. С помощью данного комплекса, можно легко получить распределение индукции магнитного поля в зависимости от величины провеса фазных проводов.

Рассмотрим задачу измерения магнитного поля под передающей воздушной линией 220 кВ для определения параметров данной линии.

Будем считать, что вектор напряженности магнитного поля не изменится вдоль координаты z (вдоль оси фаз). В качестве еще одного допущения, примем, что земля имеет абсолютно ровную поверхность. Провода представлены в виде гладких цилиндров.

Использовались следующие параметры:

Опора ВЛ 220 кВ П220-3;

Длина гирлянды изоляторов ВЛ $h_{\text{гир}} = 2.4$ м;

Диаметр фазных проводов $d = 25.60$ мм (А 400);

Величины провеса проводов 0, 3, 5, 10 м;

Ток, подаваемый на фазы $I = 1000$ А;

Частота $f = 50$ Гц.

Измерение магнитного поля проводилось на высоте 2 м над землей. Результаты измерений показаны на рис. 1. Середине опоры соответствует координата $x = 60$ м.

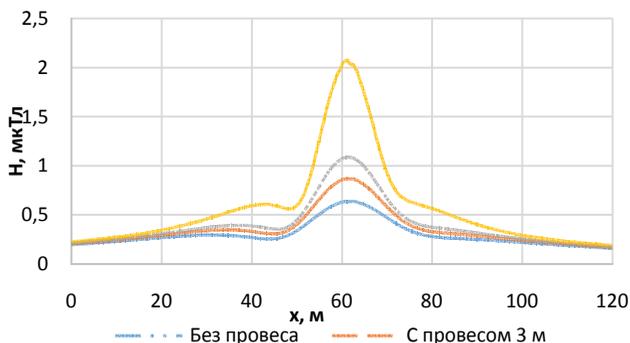


Рис. 1. Зависимость индукции магнитного поля от провеса проводов ВЛ

Как видно из рис. 1, при изменении высоты провеса проводов магнитное поле под ВЛ изменяется: в случае без провеса индукция магнитного поля составила 0.639 мкТл, при провесе 3 м – 0.869 мкТл, при провесе 5 м – 1.089 мкТл, при провесе 10 м – 2,078 мкТл.

Планируется использовать идею бесконтактного мониторинга для определения пространственных параметров линии, фазных токов и их сдвигов, небаланса токов, частоты, провеса, пляски проводов при дальнейшем выполнении работы.

Библиографический список

1. Sun X., Huang Q., Hou Y., ets. Non-contact operation-state monitoring technology based on magnetic field sensing for overhead high-voltage transmission-line. – IEEE Trans. Power Del. – 2013. – Vol. 28. – No. 4. – Pp. 2145 – 2153.

А.В. Кох, студ.;
рук. С.С. Шевченко
(НГТУ, г. Новосибирск)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

В настоящий момент в энергосистеме России активно внедряется микропроцессорная (МП) техника, заменяющая устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) на электромеханической базе. Однако данные виды оборудования являются более чувствительными к воздействию электромагнитных помех, которые могут вывести из строя микропроцессорную технику. К сожалению, подробные статистические данные в отечественной электроэнергетике отсутствуют. Однако в процессе выполнения работ по обеспечению ЭМС неоднократно приходилось сталкиваться со случаями сбоев и отказов МП аппаратуры под действием электромагнитных помех.

Например, по официальным статистикам, в США, за период 1990 – 2000 годов было зафиксировано 346 инцидентов на энергетических объектах, вызванных электромагнитными высокочастотными помехами. Также, ежегодный прямой ущерб из-за повреждения аппаратуры импульсными перенапряжениями составляет \$1,8 млрд. Первоочередным решением проблемы рекомендуется экранирование, что в большинстве случаев является эффективным средством. В более подробном изучении данной проблемы, может помочь создание экспериментальной установки, описанной ниже.

Целью работы является разработка лабораторного стенда для исследования электромагнитного экранирования. Создание стенда позволит изучать эффективность экранирования различных видов экранов, из различных материалов и сравнивать их между собой. Экспериментальное изучение подобных явлений гораздо лучше сказывается на усвоении материала студентами, а также позволит усовершенствовать сложившееся видение данного вопроса. Наличие установки даст возможность сравнивать данные, полученные аналитическими методами расчета, с экспериментальными данными.

В силу того, что электромагнитную помеху можно полноценно оценить на расстоянии длины волны, нам необходим источник СВЧ сигнала, чтобы длина волны была порядка нескольких сантиметров, а также приемник способный обнаружить и измерить сигнал достаточно высокой частоты. Во-вторых, нужно рассчитать эффективность различных экранов для оценки возможности их применения в лабораторной установке. Далее мы должны провести эксперимент в условиях, близких к тем, о которых шла речь при расчетах, чтобы оценить правильность расчета.

Также, создана графическая 3-D модель в пакете численного моделирования “COMSOL” и проведен анализ ЭМ поля оценки эффективности и демонстрации работы стенда.

В качестве источника СВЧ ЭМ сигнала использован беспроводной двухдиапазонный медиамост, транслирующий сигнал частотой 2,4 либо 5 ГГц. Он помещен в стальной короб, который препятствует распространению сигнала в пределах лаборатории достаточно хорошо (рассчитанная эффективность порядка 10^3), чтобы ЭМ сигналом, выходящим за его пределы, можно было пренебречь. Одна из сторон короба открыта и с этой стороны, рядом стоит приемник сигнала, оценивающий его мощность в дБ. В качестве приемника используется планшетный ПК, на который установлено специальное программное обеспечение.

Между источником и приемником устанавливаются плоские прямоугольные экраны из алюминиевой, а также медной фольги, чья эффективность на порядок меньше стального короба. Мощность сигнала без экрана составляет 40 дБ. После установки алюминиевого экрана сигнал ослабляется в 100 раз, то есть 20 дБ. Эксперимент показал, что рассчитанные значения эффективности совпадают с экспериментальными данными, с допустимой погрешностью в 5 – 10 %.

Библиографический список

1. **Жгун Д.В.** Электромагнитная совместимость высоковольтной техники: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 150 с.

*Р.Н. Балобанов, асп.,
рук. Д.К. Зарипов, к.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)*

ИНДИКАТОР ДЕФЕКТА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛИРУЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Надежность и экономичность работы энергосистем в значительной степени определяют технический уровень и качество энергетического оборудования, применяемого на ЛЭП и подстанциях. Одним из важнейших конструктивных элементов линий электропередачи и открытых распределительных устройств являются изоляторы. В последнее время ведутся активные разработки в направлении создания систем контроля состояния высоковольтных изолирующих конструкций. Одним из перспективных направлений является создание индикаторов дефекта, устанавливаемых на изолирующую конструкцию [1]. Разработаны различные варианты изолирующих конструкций, состоящих из цельных или составных изоляторов, с дополнительными или встроенными элементами оценки их состояния [2 – 4]. Эти элементы называют индикаторами дефекта.

Индикатор позволяет определить состояние электроизоляционной конструкции визуальным методом. Работа прибора основана на индикации изменения распределения напряжения на изоляционной конструкции при возникновении дефекта. В случае какого-либо повреждения или неисправности индикатор загорается, что говорит о том, что изолятор подлежит ревизии.

В высоковольтной лаборатории Казанского государственного энергетического университета проводились эксперименты с использованием жидкокристаллических (ЖКИ), светодиодных и газоразрядных (неоновых) индикаторов. Целью экспериментальной работы являлось показать практическую возможность обнаружения дефекта изоляции с помощью данных индикаторов.

Результаты, полученные в лаборатории, позволили перейти к натурным экспериментам на реальных объектах энергосистемы. Испытания проходили в ОРУ 110 кВ подстанции Казанской ТЭЦ-3 ОАО «ТГК-16».

В целом работы показали возможность использования предложенного метода на основе оптических индикаторов для контроля опорной изоляции ОРУ. Данные индикаторы помогут при плановых осмотрах ОРУ не только темное время суток. Индикаторы можно использовать как стационарные приборы, закрепленные непосредственно на изоляторе, так и в качестве переносного прибора, устанавливаемого на изолирующую

штангу. Остается неисследованным вопрос эффективности использования предложенных индикаторов на ВЛ из-за значительной удаленности гирлянд изоляторов от земли. Однако имеется потенциал совершенствования метода за счет установки на каждой гирлянде изоляторов одновременно нескольких индикаторов, применения оптических приборов наблюдения и систем воздушного мониторинга. При разработке промышленных образцов индикаторов также должны быть решены проблемы устойчивости к загрязнениям и неблагоприятным погодным условиям, грозovým и коммутационным перенапряжениям.

По результатам лабораторных исследований был получен патент на полезную модель. В патенте рассмотрен способ оптической дистанционной диагностики изолирующей конструкции, находящейся под напряжением [5].

Библиографический список

1. **Положение** ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/EPT_FSK_EES_2014_02_06.pdf.
2. **Симановский, И.В.** Индикатор пробоя полимерного изолятора / И.В. Симановский // *Электротехника*. – 2013. – № 6. – С. 21 – 24.
3. **Пат.** 2392679 Российская Федерация, МПК H01B17/00. Индикатор состояния высоковольтной изоляции / Старцев В.В., Любимов В.А., Соловьев Э.П., Солодков Ю.А.; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество "Арматурно-изоляторный завод". – № 2009122250/28; заявл. 10.06.09; опубл. 20.06.2010. – 12 с.
4. **Пат.** 2305848 Российская Федерация, МПК G01R31/12. Способ дистанционной диагностики многоэлементной изолирующей конструкции / Алеев Р.М., Зарипов Д.К.; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество НПФ «Оптоойл». – № 2006101129/28; заявл. 12.01.06; опубл. 10.09.2007. – 11 с.
5. **Пат.** 2517776 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ оптической дистанционной диагностики изолирующей конструкции/ Зарипов Д.К.; заявитель и патентообладатель Зарипов Д.К. – № 2012151785/28; заявл. 03.12.2012; опубл. 27.05.2014 – 6 с.

П.А. Ванчагов, студ.;
рук. С.С. Шевченко, ст. преп.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

В данной работе предлагается исследовать пространственное распределение грозových разрядов с помощью пакета MATLAB и картографических сервисов.

Необходимость исследования грозовой активности и пространственного распределения грозовых разрядов в наше время является актуальной проблемой. В электрических сетях разряды молнии являются одной из основных причин аварийных отключений оборудования, повреждений изоляции, нарушений режима работы сети. Актуальность проблемы возрастает в связи с увеличением количества высотных зданий и площади застройки, а также с активным использованием в различных сферах электронных приборов, чутко реагирующих на возмущение, вызванные грозовыми разрядами.

Была создана система грозопеленгации, состоящая из трёх регистраторов LD-250: в Чике (Новосибирская область), Рыбалово (Томская область) и Парабели (Томская область). Приборы регистрируют электромагнитный импульс грозового разряда. Регистрируется время события, тип сигнала, расстояние и азимут (пример одного показания: «09:03:28.493535, \$WIMLI,170,170,131.4*51»).

В среде MATLAB была реализована программа, считывающая показания грозопеленгаторов и пересчитывающая расстояние и азимут в точные географические координаты события с дальнейшим нанесением их на карту maps.yandex.ru.

Анализ большого объема показаний позволит составить статистику пространственного распределения ударов молнии и наглядно нанести на карту области с различной плотностью грозовых перенапряжений.

Полученная в итоге карта Томской области, отражающая пространственное распределение грозовых перенапряжений, позволит рационально осуществлять грозозащитные мероприятия на линиях, ПС и других энергетических объектах, избегая излишних бесполезных затрат.

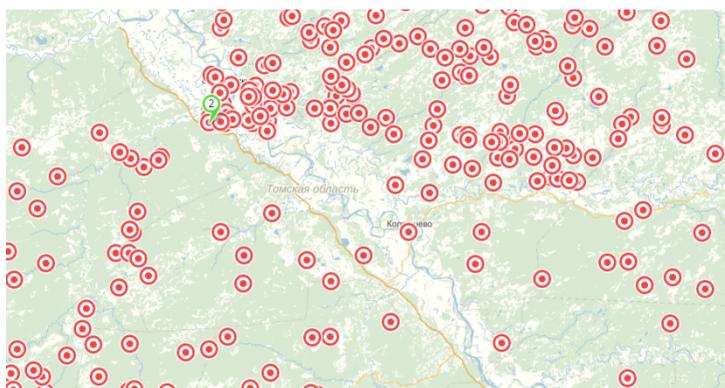


Рис. 1. Участок карты с показаниями грозопеленгатора за 1 грозовой день

В дальнейшем планируется совершенствование комплекса грозопеленгации. Предполагается, что комплекс в режиме реального времени демонстрировал бы движение грозового фронта и рассчитывал предположительное его направление, основываясь на реальных показаниях регистраторов, а не на визуальных наблюдениях метеорологов.

*Р.И. Тютин, студ.,
рук. С.С. Шевченко
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОВОЙ ОБСТАНОВКИ ВДОЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ

Молниезащита является важной задачей проектирование линий электропередач. Обусловлено это тем, что в пораженных молнией токоведущих частях электрооборудования, за счет импульсов тока молнии возникают кратковременные, но высокие по амплитуде перенапряжения – до нескольких десятков мегавольт. При этом возможны пробой и перекрытия изоляции даже в сетях высших классов напряжения. Дуга, возникающая в месте повреждения, часто продолжает гореть и после окончания импульса тока молнии – за счет подпитки от имеющихся в сети источников энергии. Это означает, что грозовое перекрытие способно перерасти в устойчивое короткое замыкание в сети. Высоковольтные линии электропередач вследствие большой протяженности подвергаются ударам молнии особенно часто (до нескольких десятков разрядов в год на 100 км длины) [1].

В работе проводится изучение грозовой обстановки вдоль высоковольтной линии 110 кВ С-15/С-16, подстанция «Левобережная» – подстанция «Мельниково», расположенная в Томской области.

Для достижения цели работы каждая опора исследуемой линии оснащается датчиком. Датчик представляет из себя тонкую полоску стали. При ударе молнии в опору или рядом происходит намагничивание стали. Таким образом измерив намагниченность датчика мы можем судить о событиях, произошедших с опорой (подвергалась ли опора ударам молнии или нет).

По показаниям намагниченности датчиков опоры поделены на три группы:

- намагниченность до 200 мкТл – опоры не подверженные ударам молнии;
- намагниченность от 200 до 500 мкТл – опоры, рядом с которыми произошел удар молнии;

• намагниченность более 500 мкТл – опоры подверженные ударам молнии.

Количество опор исследуемой линии попавших в ту или иную группу приведены в табл. 1.

Таблица 1. Условное распределение опор по группам в зависимости от намагничивания

	Намагниченность, мкТл	Количество опор
1	0 – 200	256
2	200 – 500	9
3	Более 500	8

Дополнительно были получены данные системы грозопеленгации, позволяющей определить количество и координаты ударов молнии. Совмещая эти данные с координатами опор были посчитаны плотности ударов молнии вблизи опор исследуемой линии.

В табл. 2 для примера приведены показания намагниченности датчиков некоторых опор и плотность ударов молнии в радиусе 5 км от опор, определенная с помощью системы грозопеленгации.

Таблица 2. Показания датчиков и системы грозопеленгации для опор

Номер опоры	Намагниченность, мкТл	Количество ударов молнии в радиусе 5 км
94	850	25
95	728	25
96	115	24
97	225	23
98	219	23

Библиографический список

1. Костенко М.В. и др. Физика грозового разряда и грозозащита линий электропередачи: учебное пособие. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. – 77 с.

П.Д. Азуревнин, студ.;
рук. С.С. Шевченко
(НГТУ, г. Новосибирск)

РЕГИСТРАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВО ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЯХ ПОДСТАНЦИИ МЕЛЬНИКОВО 110 кВ

Гроза представляет собой комплексную проблему для электрического оборудования подстанции. Напряжение может наводиться как от прямых ударов молнии, так и от ударов вблизи подстанции или от набежавшей

волны от линии. Особенно опасны наведенные перенапряжения для оборудования автоматических систем технического управления (АСТУ).

Автоматика очень чувствительна к изменениям напряжения. В результате коммутаций или ударов молнии во вторичных цепях появляются перенапряжения, которые могут вызвать ложное срабатывание релейной защиты или повреждение оборудования АСТУ. Для оценки защищенности оборудования и исследования перенапряжений необходим мониторинг вторичных цепей.

В начале грозового сезона 2015 года на подстанции 110 кВ Мельниково был установлен измерительный комплекс на базе платы PCI-9812 производства Adlink. Плата позволяет осуществлять сбор данных с 4-х каналов с частотой дискретизации 10 МГц, что позволяет регистрировать как грозовые, так и коммутационные перенапряжения.

На входы комплекса были подключены свободные жилы измерительных трактов, проложенных на ОРУ 110 кВ. Направления трактов были выбраны таким образом, чтобы охватить максимально возможную поверхность. Комплекс регистрировал импульсы напряжений, возникающих во вторичных цепях подстанции Мельниково. Запись импульсов напряжения начиналась при превышении уставки по напряжению в 30 В. Время записи составляло 0.02 с.

С июня по сентябрь было записано 39 осциллограмм. Уровень зафиксированных перенапряжений достигал 500 вольт. На рис. 1 показан пример записанной осциллограммы импульсов.

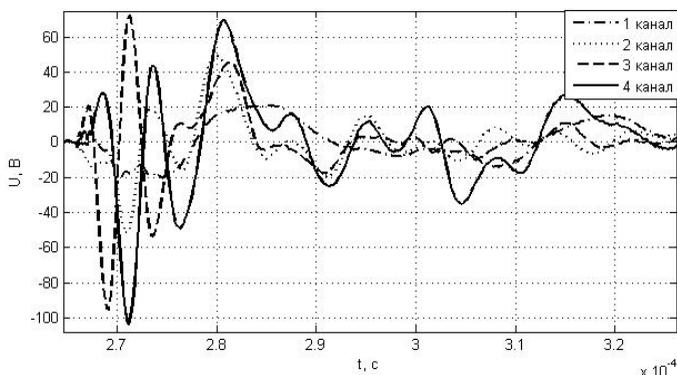


Рис. 1 Импульс, записанный комплексом 2015.07.21, время: 10:25:46

Для определения причины возникновения перенапряжений было проведено сравнение времени регистрации осциллограмм с данными из следующих источников:

1. система грозопеленгации, фиксирующая время и место ударов молнии;
2. метеорологическая служба;
3. оперативный журнал диспетчерской службы.

На основании анализа указанных источников сделан вывод, что рассмотренные импульсы имеют «негрозовую» природу.

И.В. Либрихт, студ.;
рук. С.С. Шевченко
(НГТУ, г. Новосибирск)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Современные высоковольтные залы оснащаются разнообразной измерительной техникой, построенной на микроэлектронной базе. В результате работы высоковольтного оборудования создаются высокочастотные электромагнитные импульсы, которые могут наводить на измерительную технику опасное напряжение. Такое оборудование расположено в высоковольтной лаборатории кафедры техники высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета.

Наибольшим источником помех является генератор импульсных напряжений (ГИН) 140 кВ. Электромагнитные импульсы, возникающие в момент разряда ГИНа, создают помехи в работе измерительной и вычислительной цифровой техники. Так, например, в соседней с ГИНа установкой по изучению коронного разряда, находится измерительный комплекс, состоящий из платы сбора данных и персональной ЭВМ. Высоковольтные разряды приводят к сбоям в работе данного комплекса.

Импульсная помеха может воздействовать на внутренние цепи цифровой техники или на измерительные тракты, подключенные к входам комплекса. Пример наводимого на измерительные цепи сигнала, создаваемого разрядом ГИНа, показан на рис. 1.

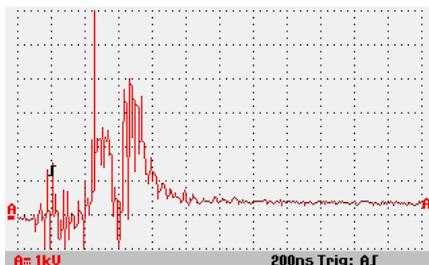


Рис. 1. Оциллограмма помехи

Как видно из осциллограммы, наводимая помеха имеет высокочастотную составляющую с амплитудой порядка единиц киловольт. Такое напряжение может вывести плату сбора данных из строя, поскольку ее допустимое входное напряжение составляет ± 10 В.

Для борьбы с помехой, создаваемой генератором импульсных напряжений, предлагается использовать следующие меры:

- экранирование измерительного комплекса;
- использование быстродействующих полупроводниковых диодных ограничителей напряжения.

М.В. Козай;
рук. С.С. Шевченко
(НГТУ, г. Новосибирск)

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА РАСЩЕПЛЕНИЯ

Выбор шага расщепления фазы является одним из шагов при проектировании воздушной линии. Расщепление позволяет исключить возникновение общей короны и, соответственно, снизить потери и увеличить пропускную способность воздушной линии.

На практике значение оптимального шага расщепления различно в зависимости от источника. Дабы внести ясность и понять те или иные практические шаги при практическом подборе оптимального шага расщепления проведем расчет самостоятельно.

Очевидно, что в основе задачи по поиску оптимального шага расщепления лежит расчет электрического поля фазы. При помощи пакета COMSOL возможно получить распределение напряженности электрического поля в зависимости от расстояния между составляющими фазами.

Рассмотрим задачу расчета оптимального шага расщепления для воздушной линии 330 кВ

Будем считать, что вектор напряженности электрического поля не изменяется вдоль координаты z (вдоль оси фазы). Данное допущение позволит упростить модель и свести задачу к выбору шага расщепления к решению двумерного электрического поля. В качестве допущения, примем, что земля имеет абсолютно ровную поверхность. Провода имеют форму гладких цилиндров.

Использованы следующие параметры:

Радиус составляющей фазного провода $r = 10,8$ мм (АС 240/32); фазное напряжение $U = \frac{330\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 269,44$ кВ.

Результаты расчета представлены на рис. 1. Минимум напряженности приходится на шаг расщепления равный 22,44 см. Напряженности приведены в относительных единицах.

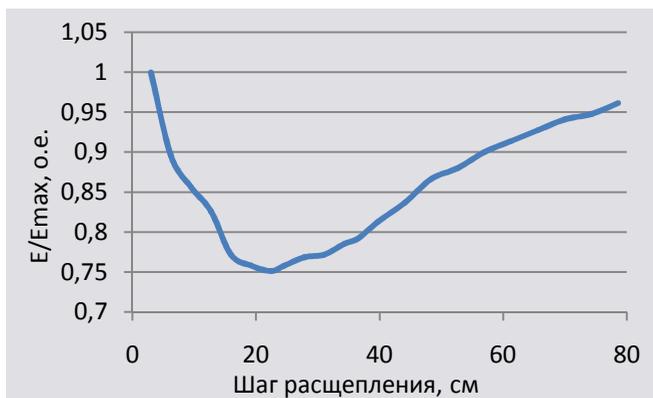


Рис. 1. Зависимость напряженности поля от шага расщепления

Оптимальные шаги расщепления для данного класса напряжения равны 40 и 60 см, что существенно выше полученного в результате расчета значения.

Н.Н. Петров, студ.;
рук. Г.А. Евдокунин, д.т.н., проф.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)

НАВЕДЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ НА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ПРИ БЛИЗКОМ УДАРЕ МОЛНИИ

Напряжения, наводимые близкими ударами молний, могут вызвать как повреждения на силовом оборудовании, так и в цепях управления и защиты. Механизм возникновения этих напряжений изучается с начала девятнадцатого века, но до сих пор нет единого мнения в методах получения адекватного результата. На данный момент представлен ряд теоретических исследований и существуют различные модели для расчёта такого класса наведенных напряжений. Параллельно с теоретическими проводились экспериментальные исследования. В литературе представлен ряд результатов полученных на экспериментальных линиях. Учиты-

вая всю сложность рассматриваемого явления, анализ результатов, полученных теоретически и экспериментально, показывает их неплохое соответствие. Вопрос об адекватности тех или иных моделей, предлагаемых для расчета наведенных напряжений такого рода, до сих пор остаётся открытым, отчасти, из-за отсутствия полных экспериментальных данных таких как: ток молнии (его распределение по каналу), скорость развития главного разряда молнии, поле, создаваемое током молнии, наведённые напряжения.

Определение наведённых напряжений на воздушной линии проводится в три этапа:

1. Рассчитывается электромагнитное поле по всей длине линии, при этом используется модель тока молнии, как функция времени и высоты канала. Канал тока молнии принимается в виде прямой вертикальной антенны [1].

2. Полученное ЭМП используется для расчёта наведённых напряжений при помощи модели, описывающей взаимодействие между полем и линией. Данная модель строится на основе теории линий электропередач [2].

3. По рассчитанным наведенным напряжениям определяется форма и амплитуда волн на линии на произвольном расстоянии от места удара молнии.

Разработанный алгоритм расчета наведенных напряжений был реализован в математическом пакете MATLAB, а затем, для увеличения скорости расчета, в пакете VBA (Visual Basic for Applications) для Microsoft Excel. На разработку, отладку и тестирование программного продукта была затрачена значительная часть времени работы над диссертацией.

Входными данными для программы расчета перенапряжений являются:

- 1) Ток канала молнии: I_0 ; α и β ; λ – постоянная затухания тока; V – скорость развития разряда.

- 2) Геометрия: H ; Y_0 ; L ; h ; r – расстояние от канала до участка линии Δx .

- 3) Описание линии. R_0 и R_L ; Z_B – волновое сопротивление;

- 4) Время расчета – T .

- 5) Шаг расчета. Шаг расчета по времени связан с числом участков разбиения N : $\Delta t = L/(N \cdot c)$.

Анализ результатов, полученных на компьютерной модели, показал влияние различных составляющих поля, создаваемых каналом молнии, на наведенное напряжение и ток на воздушной линии. Были получены зависимости величины наведенных напряжений от различных параметров: расстояния до канала молнии, амплитуды тока главного разряда, крутизны фронта, скорости развития разряда, величины нагрузочных сопротивлений. Рассмотрено влияние параметров земли на наведенное напряжение [3].

Библиографический список

1. **Nucci C.A.** Lightning-induced voltages on overhead power lines. Part 1. Electra. – 1995. – No. 161.
2. **Nucci C.A.** Lightning-induced voltages on overhead power lines. Part 2. Electra. – 1995. – No. 162.
3. **Демирчян К.С.,** Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. В 3-х т. – Питер, 2003.

К.С. Пантелева, студ.;
рук. М.Ш. Гарифуллин, д.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)

**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ
СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Силовой масляный трансформатор, как и другие виды трансформаторов, является в энергосистеме одним из важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения потребителей.

Контроль состояния изоляционной системы является ключевым звеном, гарантирующим его безаварийную эксплуатацию.

Главная особенность силовых трансформаторов – использование бумажно-масляной изоляции с охлаждением циркулирующего масла в баке, защищенном от окружающего воздуха.

При эксплуатации в масляных трансформаторах протекают сложные физико-химические процессы, влияющие на твердую изоляцию. В частности, в масле образуются вода и кислоты, являющиеся агрессивными соединениями.

В результате проведенного литературного обзора по современным материалам было выявлено, что перспективным развитием технологии производства твердой изоляции является ламинирование. Ламинация – это технологический процесс покрытия изделия пленкой, который предотвращает деформацию изделия, делает его водостойким, паронепроницаемым, придает твердость. Ламинирование с использованием полиэфирной пленки повышает механическую прочность бумаги, способствуя тем самым улучшению технологичности применения высококачественных бумаг. В то же время эффект применения этой пленки является комплексным, так как способствует улучшению тепловых, механических, электрических характеристик бумаги, а также ее стойкости к воздействию ультрафиолетового излучения.

Среди предлагаемых типов ламинированных материалов можно отметить нетканую бумагу из полифениленсульфида, которая разработана для

использования в условиях, требующих длительной эксплуатации при высоких температурах или стойкости к воздействию химических веществ, в том числе масел, растворителей и кислот, а также ламинаты из неорганической изоляционной бумаги.

Целью перспективных исследований является сравнение поведения новых и традиционных материалов при ускоренной деградации.

К.Ю. Блинова, студ.;
рук. Л.И. Шишкова
(СамГТУ, г. Самара)

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСШИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ (СКИТ)

Наиболее опасные с точки зрения длительности недоотпуска электроэнергии, финансовых потерь и возможности восстановления трансформаторного электрооборудования, т.е. его ремонтпригодности – внутренние повреждения обмоток силовых трансформаторов. Первопричиной таких повреждений может быть внутренний пробой витковой изоляции в результате деструкции изоляции под воздействием эксплуатационных факторов и действия частичных разрядов в месте будущего пробоя, которые могут быть результатом коммутационных, грозовых и иных повышенных воздействий на изоляцию [1].

Комплекс СКИТ предназначен для автоматического с малым периодом контроля параметров, определяющих процессы старения изоляции трансформаторов, а также зарождения и развития дефектов в них.

Использование данного комплекса позволяет предотвратить аварийные повреждения трансформатора, вызванный старением или развитием местного дефекта изоляции; определять техническое состояние трансформатора и производить своевременный ремонт; увеличить межремонтный период; иметь постоянное представление о текущем состоянии изоляции.

В состав комплекса входят: блок встроенных датчиков (БВД), коммутационный модуль (КМ), трансформаторный модуль (ТМ), Центральный модуль (ЦМ), устройства присоединения (УП), комплект акустических датчиков частичных разрядов (АДЧР).

Комплекс может работать в автоматическом автономном или в ручном режиме. Нормальный режим работы – автоматический автономный. В этом режиме постоянно работающий ЦМ автоматически включает с определенной периодичностью (периодичность включения по умолчанию составляет 24 часа) измерительные устройства, проводит измерение

всех параметров, архивирует получаемую информацию и отключает измерительные устройства. В случае необходимости возможны режимы с периодичностью до 3 часов. В экстренных случаях возможно снятие показаний датчиков с периодичностью от 10 минут (непрерывный режим), но при этом показания датчика концентрации растворенных в масле газов будут сильно заниженными и их необходимо будет исключить из дальнейшей обработки. Ручной режим применяется для настройки режимов измерений при первичном монтаже комплекса и в эксплуатации не используется.

Комплекс рассчитан на работу в особо опасных помещениях, поэтому величина напряжения на элементах комплекса не превышает 24 В (за исключением кабелей питания БВД, КМ, ТМ и ЦМ – 220 В).

Измерительные цепи комплекса подключаются к измерительным выводам вводов высокого напряжения. По условиям эксплуатации вводов эти выводы должны иметь постоянную гальваническую связь с землей. Если измерительный вывод оказывается изолирован от земли, на нем появляется высокое (порядка 10 кВ) напряжение. Устройства присоединения имеют цепи защиты от обрыва заземляющих устройств, однако при необходимости переключения измерительных кабелей от УП или при проведении периодических измерений на вводах необходимо применять соответствующие меры безопасности. Комплекс СКИТ относится к постоянно работающему оборудованию. После запуска его в работу дополнительной подготовки не требуется. После отключений комплекса в случае потери питающего напряжения или по иным причинам после восстановления питания работа комплекса СКИТ восстанавливается автоматически и дополнительных мер не требуется.

В случае если условия измерений изменились (появились дополнительно некомпенсированные помехи, изменился уровень сигналов – зашкаливает измеритель частичных разрядов и др.) необходимо изменить режим измерения данного параметра.

Оценка фактического состояния силовых трансформаторов по результатам диагностических измерений является на сегодняшний день сложной и актуальной задачей. Трансформаторы с незначительными дефектами могут эксплуатироваться еще в течение многих лет. При дальнейшей эксплуатации, особенно при повторных близких КЗ, вероятен аварийный выход трансформатора из строя. Избежать этого поможет своевременная диагностика состояния изоляции трансформаторов на предмет обнаружения деформаций [2].

Библиографический список

1. **Степанов В.П.**, Танаев А.К., Хренников А.Ю., Шишкова Л.И. Диагностика и повреждаемость высоковольтного электрооборудования в электроэнергетических системах. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 158 с.

2. Хренников А.Ю., Терешко О.А. Основные методы диагностики состояния электрооборудования для выявления дефектов и повреждений. – М.: ВИПКэнерго, 2005. – 50 с.

*В.Г. Крестинков, магистрант;
Д.А. Семенов, к.т.н.,
А.С. Серебряков, д.т.н., проф.
(НГИЭУ, г. Княгинино)*

УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

На современном этапе эксплуатации энергетических систем более 70 % основного трансформаторного оборудования уже выработало свой ресурс времени, регламентированный нормативными документами. Поэтому возникает опасность внезапного их отказа, что приводит к снижению надежности и качества электроснабжения, а также увеличению затрат на устранение внезапных отказов. При этом более 25 % отказов приходится на долю главной изоляции. Чтобы своевременно выявлять развивающиеся дефекты и не допускать аварий за счет внезапных пробоев электрической изоляции, свойства ее в процессе эксплуатации необходимо периодически проверять. Для этого на кафедре «Электрификация и автоматизация» в ГБОУ ВО НГИЭУ были разработаны устройства (рис. 1, 2), защищенные патентом на изобретение [3, 4, 5], одно из которых предназначено для профилактических испытаний и диагностики изоляции высоковольтных электрических машин и трансформаторов разного класса напряжения, а другое для мониторинга состояния их изоляции под нагрузкой в реальном режиме времени с определением остаточного ресурса. С использованием данных устройств при тестовой диагностике и постоянным мониторингом повышается объективность и достоверность оценки остаточного срока службы высоковольтной изоляции.



Рис. 1. Устройство диагностики электрической изоляции

Разработанное устройство диагностики электрической изоляции (рис. 1) обладает уникальным программным обеспечением «PROSTARESIS-1», свидетельство Роспатента о регистрации программы № 2013617538, позволяющим выполнять [2]:

- анализ качества изоляции;
- определение остаточного ресурса трансформатора;
- определение других параметров, характеризующих качество изоляции,

таких как ток абсорбции, коэффициент абсорбции, $\text{tg}\delta$ и отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$.

Работа устройства основана на методе диагностики изоляции по напряжению саморазряда и возвратному напряжению. Как показали проведенные нами исследования [1], данный метод является актуальным по определению остаточного ресурса трансформаторов, отработавших свой ресурс времени, регламентированный нормативно-техническими документами (НТД).

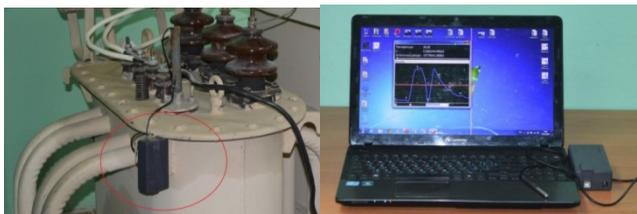


Рис. 2. Устройство для измерения израсходованного срока службы электрической изоляции в режиме реального времени по температуре наиболее нагретой точки (ННТ) трансформатора

Автоматический блок, полностью управляемый компьютером, измеряет: напряжение саморазряда; возвратное напряжение изоляции; сопротивление изоляции; коэффициент поляризации; коэффициент абсорбции. С помощью предлагаемого устройства, можно определить остаточный ресурс трансформаторов различной мощности. Что позволит составить график очередности замены трансформаторов, отработавших свой срок службы. Тем самым можно достичь снижения эксплуатационных расходов и повысить качество электроснабжения за счет уменьшения внезапных отказов.

А разработанное устройство мониторинга (рис. 2) позволяет: контролировать температуру верхних слоев масла трансформатора; определять максимальные и минимальные значения температуры за контролируемый период (день, неделю, месяц и год); сигнализировать о возникновении нештатных ситуаций при превышении уставок по температуре; энергонезависимое хранение всех контролируемых параметров; выдавать всю пе-

рчисленную информацию по интерфейсу в систему АСУ ТП; точно контролировать температурные режимы, влияющие на срок службы трансформатора. При этом, контролируя ток нагрузки и температуру масла, по известной схеме теплового моделирования определяется температура наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки. Знание температуры ННТ позволяет рассчитывать остаточный ресурс трансформатора.

Библиографический список

1. **Серебряков А.С.**, Семенов Д.А. Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 2 – 8.
2. **Серебряков А.С.**, Семенов Д.А. Свидетельство Роспатента РФ №2013617538 от 19.08.2013 о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ программы расчета остаточного ресурса изоляции трансформаторов (PROSTAREISIS-1).
3. **Пат.** на ПМ № 119125 РФ. Устройство для контроля качества электрической изоляции / Серебряков А.С., Семенов Д.А., Степанов Б.С., Игнаткин Д.Н. Оpubл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
4. **Пат.** на изобретение № 2483312 РФ. Устройство для контроля качества электрической изоляции / Серебряков А.С., Семенов Д.А. Оpubл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
5. **Пат.** на изобретение № 2535656 РФ. Устройство для измерения израсходованного срока службы электрической изоляции / Серебряков А.С., Семенов Д.А. Оpubл. 20.12.2014, Бюл. № 35.

*Н.А. Савчук, магистр,
Е.В. Курьяков;
рук. В.В. Хромов, к.т.н., с.н.с.
(НИИ (ВСИ МТО ВС РФ) ВА МТО)*

ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ШАГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для персонала, эксплуатирующего электроустановки могут представлять опасность напряжения прикосновения и шаговые напряжения. Согласно требованиям нормативных документов для обеспечения безопасности оперативного персонала должно применяться защитное заземление [1, 2, 3]. Снижения указанных перенапряжений до безопасного для персонала уровней может быть достигнуто посредством оптимальных конструкций заземляющих устройств (ЗУ).

При замыкании фазы электрической сети на землю, на ее поверхности появляется значительный электрический потенциал, сопровождающийся процессами растекания тока и, как следствие, снижением потенциала. Персонал, находящийся в окрестности растекания тока, может попасть под шаговое напряжение.

Из характера кривой спада потенциала [4, 5] следует, что шаговое напряжение убывает по мере удаления от заземлителя и увеличивается при приближении к нему. При аварийных ситуациях наибольшее шаговое напряжение наблюдается вблизи заземлителя.

Из вышеизложенного возникает объективная необходимость разработки конструкции ЗУ, которая позволяет существенно снизить или предотвратить вынос потенциала на поверхность грунта. При этом ЗУ должно соответствовать требованиям государственных стандартов, правил устройства электроустановок, строительных норм и правил и других нормативно-технических документов, обеспечивающих условия безопасности людей, эксплуатационные режимы работы и защиту электроустановок.

Для снижения величины шагового напряжения разработана конструкция электрода рабочего заземления, защищенного патентом РФ: RU 2416137 С1 [6]. Данный электрод выполнен двухзональным и содержит расположенные в скважине кабельный токовод с влагозащитной и электроизоляционной оболочкой, расположенные в верхней зоне и токопроводящую поверхность, расположенную в нижней зоне (рис. 1).

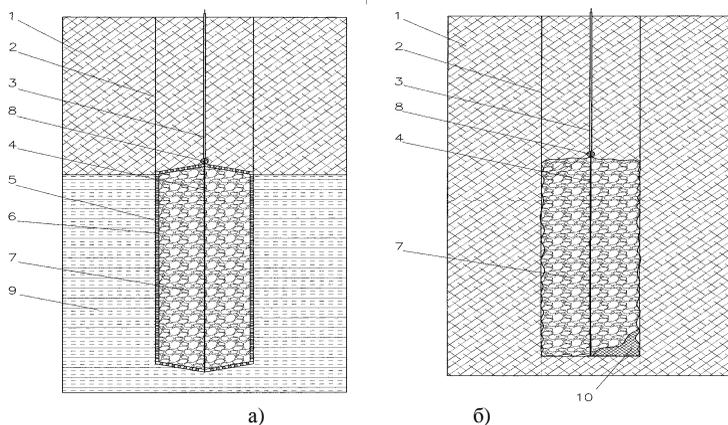


Рис. 1. Конструкция рабочего заземления: а – в виде перфорированной обсадной трубы, б – в виде сетки контейнера: 1 – верхний слой грунта, 2 – скважина, 3 – электрический кабель, 4 – металлический электрод, 5 – обсадная труба, 6 – отверстия в обсадной трубе, 7 – углеродистая засыпка, 8 – место соединения, 9 – водоносный слой, 10 – сетка контейнера

Свои функции электрод рабочего заземления выполняет следующим образом. При аварийных ситуациях ток электрической сети затекает в одножильный кабель с изолированным покрытием, а далее ток затекает на расположенный в глубине скважины металлический электрод, распо-

ложенный в нижней зоне. От нижнего электрода электрический ток через углеродистую засыпку перетекает к водоносному слою (грунтовым водам) и далее через корпус обсадной трубы или через корпус сетки контейнера, непосредственно в окружающий их грунт. Растекание электрического тока в грунте происходит в нижней зоне, что существенно предотвращает вынос потенциала на поверхность грунта.

Данная конструкция заземляющего устройства соответствует требованиям правил технической эксплуатации электроустановок потребителей. Применение одножильного электрического кабеля с надежным изоляционным покрытием в качестве токовода, расположенного в верхней зоне и металлического электрода, расположенного в нижней зоне, позволяет значительно уменьшить величину шагового напряжения, что обеспечивает защиту оперативного персонала от поражения электрическим током.

Библиографический список

1. **Техника** высоких напряжений / под ред. Ларионова В.П. – М: Атомиздат, 1989.
2. **ГОСТ 12-1-009-76-1999.** Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Термины и определения.
3. **ГОСТ Р МЭК 61140-2000.** Защита от поражения электрическим током.
4. **Правила** устройства электроустановок. Изд. 7. – М., Изд-во НИЦ ЭНАС, 2005.
5. **Демирчян К.С.,** Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. 5-е изд. Т.1. – СПб.: Питер, 2009. – 512 с.
6. **Пат.** РФ: RU 2416137 C1 от 10.04.2011 года, МПК H01R4/66, Электрод рабочего заземления / Борисов А.А., Громов О.И., Савчук А.Д., Хромов В.В.

М.В. Акульшина, А.Ю. Шуркина, студ.;
рук. О.А. Баженов к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ ГЛАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИНДУКТИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Каждый выпускаемый с завода трансформатор подвергается приемодаточным испытаниям, в программу которых как обязательное входит испытание прочности изоляции напряжением промышленной частоты. Существует два вида испытаний внутренней изоляции: приложенным от постороннего источника напряжением (при отсутствии возбуждения магнитопровода) и возбуждением трансформатора индуктированным напряжением. Однофазные и трехфазные трансформаторы напряжением 110 кВ и выше с пониженной изоляцией нейтрального конца обмотки ВН испытываются напряжением, индуктированным частично или полностью в испытываемом трансформаторе [1].

При испытании индуктированным напряжением обмоток трансформаторов (силовых и напряжения) с неполной изоляцией нейтрли схема испытания выбирается таким образом, чтобы испытать, по возможности одновременно, следующие промежутки [2]:

- 1) между линейным концом высшего напряжения (ВН) и землей;
- 2) между линейным концом ВН и ближайшими к нему точками соседних обмоток низшего напряжения (НН) и среднего напряжения (СН), нормально электрически не соединенных с обмоткой ВН;
- 3) между линейным концом СН и землей – в случае автотрансформатора и трехобмоточного трансформатора с обмоткой СН класса 110 кВ и выше;
- 4) между линейными концами соседних фаз ВН, расположенных снаружи других обмоток.

На рис. 1а, 1б показаны упрощенная принципиальная схема испытания однофазного трансформатора и диаграмма распределения индуктированных напряжений по обмоткам.

Для устранения опасных электростатических влияний и получения фиксированной разности потенциалов между испытываемой обмоткой и всеми обмотками НН последним должен быть сообщен потенциал земли. Это достигается заземлением у каждой обмотки или одного из ее концов или средней ее точки.

При испытании однофазных трансформаторов по схеме а, рис. 1 для получения на линейном конце обмотки (ВН испытательного напряжения, равного, например, двойному линейному напряжению, требуется дать трансформатору возбуждение в $2\sqrt{3} = 3,46$ раза больше номинального. Поэтому во избежание чрезмерного повышения индукции в магнитной системе испытываемого трансформатора требуется источник питания с частотой не менее 175 Гц. Обычно применяют генераторы с частотой 200 – 250 Гц.

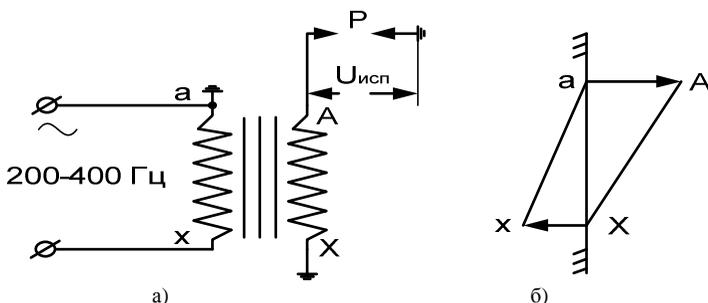


Рис. 1: а – Упрощенная принципиальная схема испытания однофазного трансформатора; б – Диаграмма распределения индуктированных напряжений по обмоткам

При испытании главной изоляции линейных концов обмотки ВН индуктированным напряжением одновременно испытывается продольная изоляция всех обмоток трансформатора.

Поэтому отдельного испытания продольной изоляции индуктированным напряжением не требуется, если испытания приложенным напряжением главной изоляции других обмоток, а также изоляции нейтрального конца обмотки ВН были проведены до испытания индуктированным напряжением линейного конца обмотки ВН.

При испытании изоляции индуктированным напряжением трансформатор считается выдержавшим испытание, если не наблюдалось:

- 1) толчков тока;
- 2) нарушения симметрии напряжения по фазам (у трехфазных трансформаторов);
- 3) выделения дыма из отверстия расширителя или крышки (если нет расширителя), которые при испытании должны быть открыты;
- 4) перекрытия на шарах (если трансформатор во время испытания был защищен шаровым разрядником).

Библиографический список

1. Долин, А.П. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов / А.П. Долин, Н.Ф. Першина, В.В. Смекалов // Электрические станции. – 2000. – № 6.
2. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия (Power Transformers. General specifications). – М.: Изд-во Стандартиформ, 2007.

*А.Г. Назаров, магистрант;
рук. Ю.А. Митькин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕСЧЁТА ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА С МАЛЫХ ОБРАЗЦОВ НА БОЛЬШИЕ

В рассматриваемом случае реальная изоляционная конструкция рассматривается в виде m параллельно соединённых единичных образцов с функцией распределения пробивных напряжений $F(1, U)$. Тогда вероятность наличия элемента с наиболее низкой электрической прочностью возрастает с увеличением числа m , что приводит к снижению пробивных напряжений большого образца. Достоверность пересчёта результатов испытаний с малых образцов на большие во многом определяется выбором функции распределения $F(1, U)$.

Далее анализируется изменение функций распределения большого образца $F(m,U)$ в зависимости от m при использовании в качестве функций $F(1,U)$ соответственно распределений нормального закона и Гнеденко–Вейбулла:

$$F(m, U) = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot U \int_{-\infty}^{\left[\frac{(U - U_{\text{пр}})^2}{2\sigma^2} \right]} \exp \left[-\frac{(U - U_{\text{пр}})^2}{2\sigma^2} \right] dU \right\}^m, \quad (1)$$

$$F(m, U) = 1 - \exp \left[-m \left(\frac{U - U_H}{U_0 - U_H} \right)^\alpha \right]. \quad (2)$$

Исследования проведены по результатам испытаний 4 образцов масла в маслоробойнике, статистические характеристики пробивных напряжений которых приведены в таблице.

Таблица. Статистические характеристики пробивных напряжений

Образцы масла, №	$\langle U_{\text{пр}} \rangle$, кВ	$V_{\langle U_{\text{пр}} \rangle}$, %	$\sigma_{U_{\text{пр}}}$, кВ	$V_{U_{\text{пр}}}$, %	U_H , кВ	U_0 , кВ	α
1	68	2,01	3,35	4,92	56,19	69,23	3,97
2	68,5	5,59	9,38	13,69	35,31	71,94	3,97
3	61,3	4,51	6,77	11,04	59,62	66,72	1,179
4	66,33	3,52	5,72	8,62	50,5	62,61	1,642

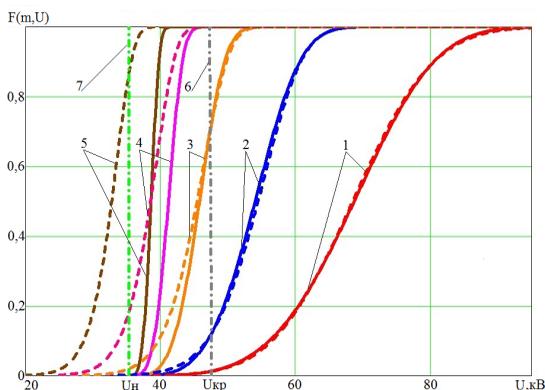
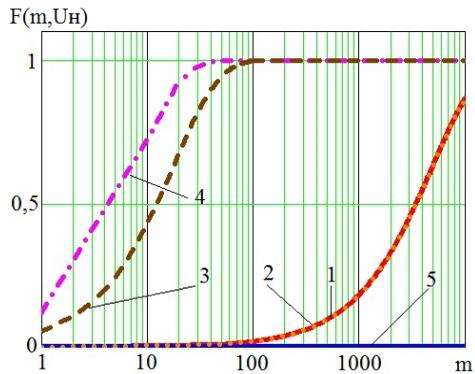


Рис. 1. Функции распределения пробивных напряжений $F(m, U)$ для образца № 2: при различных $F(1,U)$: - - - нормальный закон; — — — распределение Гнеденко–Вейбулла; 1, 2, 3, 4, 5 — для m соответственно: 1, 10, 10^2 , 10^3 , 10^4

Результаты расчётов представлены на рис. 1 и 2. Из рис. 1 следует, что с ростом m функции распределения $F(m, U)$ при нормальном законе для $F(1, U)$ сдвигается в область меньших пробивных напряжений за пределы нижнего пробивного напряжения U_H . При распределении Гнеденко–Вейбулла для $F(1, U)$ функции $F(m, U)$ сдвигаются влево и стремятся к U_H при возрастании m , что соответствует физическому смыслу. Из рис. 2 видно, что вид зависимостей вероятности пробоя образцов масла от параметра m при $U = U_H$ при нормальном законе для $F(1, U)$ определяется качеством масла, причём во всех случаях $F(m, U_H) > 0$, что не соответствует физическому смыслу. При распределении Гнеденко–Вейбулла для $F(1, U)$ функции $F(m, U_H) = 0$, что соответствует физическому смыслу.

Рис. 2. Зависимости значений функций $F(m, U_H)$ при различных $F(1, U)$: 1, 2, 3, 4 – нормальный закон распределения для образцов масла соответственно 1, 2, 3, 4; 5 – распределение Гнеденко–Вейбулла для всех образцов масла



Полученные результаты показывают, что для пересчёта пробивных напряжений масла с малых образцов на большие следует применять для $F(1, U)$ распределение Гнеденко–Вейбулла, который содержит нижний предел пробивного напряжения и соответствует статистическому характеру формирования пробоя масла.

*А.С. Новикова, А. Танкой, А.Ю. Соболев;
рук. В.Ф. Воробьёв, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Кабельные системы являются одними из основных способов передачи электроэнергии. Применение таких линий возможно на разные классы

напряжения и на сегодняшний день в России освоены технологии строительства и эксплуатации кабельных линий до 500 кВ. Общая протяженность распределительных кабельных сетей в нашей стране достигает более 300 тыс. км.

В настоящее время для изоляции кабельных линий используются бумажно-пропитанная изоляция и изоляция из сшитого полиэтилена. Технико-экономические показатели изоляции из сшитого полиэтилена значительно выше, поэтому в последнее время на российском рынке наблюдается стабильное увеличение производства-потребления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

Для нормальной эксплуатации кабельных систем необходимо контролировать надежность их изоляции. Существует ряд диагностических методов, позволяющих выявить дефекты в изоляции кабелей. Все методы диагностирования изоляции условно можно разделить на две группы: прямые и косвенные.

Наиболее информативным методом оценки качества изоляции является контроль частичных разрядов (ч.р.). Увеличение интенсивности ч.р. происходит непосредственно перед пробоем изоляции. Испытание изоляции кабелей проводят на постоянном напряжении или сверхнизких частотах (СНЧ). В этом случае все участки изоляции кабельной системы находятся под одинаковым напряжением. При этом воздействии достаточно сложно определить место возникновения ч.р.

В данной работе рассматривается метод диагностирования кабельной изоляции, основанный на измерении ч.р., при воздействии на нее импульсов высокого напряжения (ВН). Для локализации места возникновения ч.р. по длине кабеля предлагается применять импульсы с длительностью порядка нескольких десятков-сотен наносекунд. В этом случае импульс воздействующего высокого напряжения приложен не ко всей протяженности кабеля, а только к его части длиной 1 – 10 м. С целью упрощения технологии локализации кабельной системы импульсами ВН предлагается накладывать его на постоянное испытательное напряжение или на испытательное напряжение СНЧ в момент достижения максимумов. В этом случае информация от возникающих ч.р. приходит к измерительной системе с некоторым временем запаздывания ΔT . При известной скорости распространения импульса можно определить место дефекта, а по характеристикам оценить природу происхождения. В работе предложена схема испытательной установки, а также приводится техническое решение её практического применения.

А.Д. Бачурина, студ.;
рук. Т.Е. Шадриков, асс.,
А.М. Соколов, д.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА РАЗВЕТВЛЕННОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В настоящее время ведутся исследования высоковольтных кабельных электропередач с нетрадиционными параметрами токов и напряжений (трапецеидальная форма напряжения, повышенная/пониженная частота) [1, 2, 3]. Такие электропередачи могут найти применение на предприятиях, использующих устройства электротепловой обработки или закалки. Для подключения нескольких устройств обработки необходимо использовать разветвленную сеть электропитания повышенной частоты. Однако внедрению такой сети должен предшествовать этап тщательного анализа и технико-экономического исследования высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты.

Электрическая схема локальной высоковольтной кабельной электропередачи с нетрадиционными параметрами токов и напряжений представлена на рис. 1. Разветвленная сеть получает питание с зажимов полупроводникового преобразователя напряжения через повышающий силовой трансформатор Tr_1 . К вторичной обмотке Tr_1 подключена кабельная линия длиной l_{k1} , к выходу которой через понижающий силовой трансформатор Tr_2 и реактор L_p включаются активная нагрузка $R_{н2}$, а также кабельная линия длиной l_{k2} , к которой, в свою очередь, через понижающий силовой трансформатор Tr_2 подключена активная нагрузка $R_{н1}$.

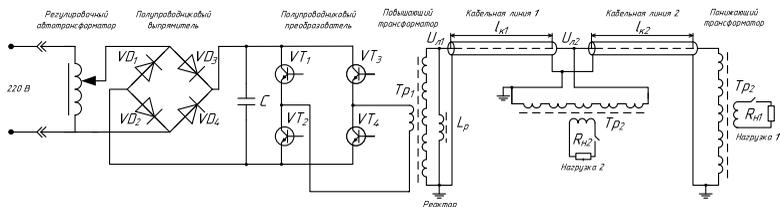


Рис. 1. Электрическая схема локальной высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты: $VD_1 - VD_4$ – силовые диоды полупроводникового преобразователя; C – емкость на шинах постоянного тока; $VT_1 - VT_4$ – силовые транзисторы полупроводникового преобразователя; Tr_1 , Tr_2 – повышающий и понижающий силовые трансформаторы соответственно; L_p – реактор; l_{k1} , l_{k2} – длина кабельной линии электропередачи 1 и 2 соответственно; $R_{н1}$, $R_{н2}$ – нагрузка 1 и 2 соответственно

На рис. 2 представлена схема замещения локальной высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты. Силовые трансформаторы представлены Т-образной схемой замещения с учетом емкостей обмоток ВН и НН на землю. Высоковольтные кабельные линии представлены П-образной схемой замещения с сосредоточенными параметрами.

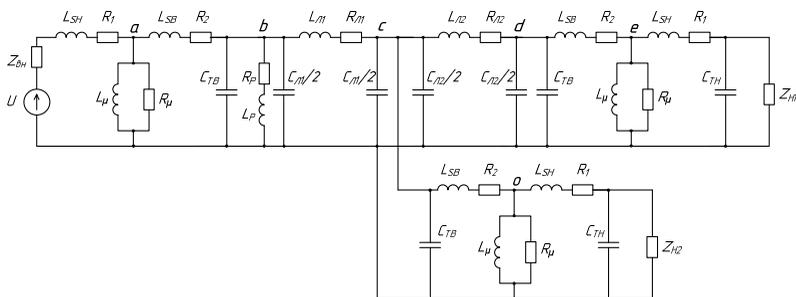


Рис. 2. Схема замещения локальной высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты: U – источник напряжения; $Z_{вн}$ – внутренне сопротивление источника напряжения; $C_{ТН}$ и $C_{ТВ}$ – емкость обмоток ВН и НН силовых трансформаторов соответственно; L_{SH} и L_{SB} – индуктивности рассеивания обмоток ВН и НН силовых трансформаторов соответственно; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток ВН и НН силовых трансформаторов соответственно; $R_{Р}$, $L_{Р}$ – активное сопротивление и индуктивность реактора соответственно; $C_{Л1}$, $L_{Л1}$, $R_{Л1}$, $C_{Л2}$, $L_{Л2}$, $R_{Л2}$ – емкость, индуктивность, активное сопротивление кабельной линии электропередачи 1 и 2 соответственно; $R_{Н1}$, $R_{Н2}$ – нагрузка 1 и 2 соответственно

Расчет модели разветвленной сети электроснабжения предлагается провести путем эквивалентного преобразования схемы замещения в схему с меньшим количеством ветвей и узлов. Далее применяется методы частотного анализа схемы и преобразований Фурье. Данный метод позволяет упростить анализ протекающих процессов в высоковольтной кабельной электропередаче повышенной частоты. При моделировании рассматриваемой разветвленной сети в программном комплексе MATLAB модель сети позволяет регулировать число длину кабельных отходящих линий, количество потребителей и их параметры.

Библиографический список

1. **Принципы** организации современной электроэнергетики / Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д. [и др.] // Энергетик. – 2014. – № 3. – С. 46 – 49.
2. **Принципы** организации современной электроэнергетики / продолжение / Федосов С.В., Гусенков А.В., Лебедев В.Д. [и др.] // Энергетик. – 2014. – № 4. – С. 15 – 18.
3. **Технико-экономические** показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты / Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Шадриков Т.Е., Соколов А.М. // Энергетик. – 2015. – № 2. – С. 11 – 14.

*А.А. Дьячков, студ.;
рук. Т.Е. Шадриков, асс.,
А.М. Соколов, д.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В связи со значительным развитием отрасли силовой полупроводниковой техники становится возможной задача создания и исследования высоковольтных кабельных электропередач с нетрадиционными параметрами токов и напряжений (трапецеидальная форма напряжения, повышенная/пониженная частота) [1, 2]. Такие электропередачи обладают повышенным КПД, силовое оборудование обладает сниженными массогабаритными характеристиками и т.п., что позволяет организовать электроснабжение локальных потребителей электроэнергии с минимальными потерями в сети. Внедрению таких электропередач должен предшествовать этап моделирования их в различных режимах работы – нормальных и аварийных.

Электрическая схема высоковольтной кабельной электропередачи с нетрадиционными параметрами токов и напряжений представлена на рис. 1. Электропередача получает питание с зажимов полупроводникового преобразователя напряжения через повышающий силовой трансформатор Tr_1 . К вторичной обмотке Tr_1 подключена кабельная линия длиной l_k , к выходу которой через понижающий силовой трансформатор Tr_2 . В электропередаче присутствует реактор L_p , на выходе трансформатора Tr_2 включен нихромовый шунт (опыт КЗ, либо разрыв в опыте ХХ).

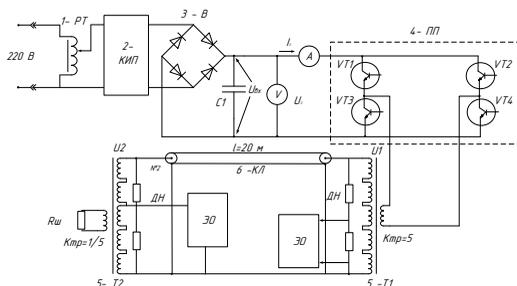


Рис. 1. Электрическая схема высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты: 1 – регулировочный трансформатор, 2 – контрольно-измерительная аппаратура, 3 – выпрямитель, 4 – преобразователь напряжения, 5 – понижающий/повышающий трансформатор, 6 – кабельная линия

По результатам проведения экспериментов опыта холостого хода и короткого замыкания были получены экспериментальные осциллограммы напряжения на конце трансформатора Tr_2 и на шунте в опыте короткого замыкания (рис. 2).



Рис. 2. Осциллограммы экспериментальных исследований высоковольтной кабельной электропередачи, повышенной в опыте холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

Сопоставляя результаты экспериментальных данных (рис. 2) с результатами, полученными в ходе применения методики расчета электрических цепей с несинусоидальными источниками [3] можно сделать вывод о хорошем согласовании результатов эксперимента и результатов расчетной модели.

Библиографический список

1. **Технико-экономические** показатели силовых трансформаторов высокого напряжения локальных электроэнергетических систем переменного тока повышенной частоты / Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Шадриков Т.Е., Соколов А.М. // Энергетик. – 2015. – № 2. – С. 11 – 14.
2. **О возможности** и целесообразности физического моделирования электропередачи с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений / Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов, А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев // Энергетик. – 2015. – № 4. – С. 29 – 32.
3. **Особенности** применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения / Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М. [и др.] // Электричество. – 2016. – № 1. – С. 4 – 12.

И.В. Бабурин, М.Э. Софьина, студ.;
рук. М.Е. Тихов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИМЕНЕНИЕ COMSOL MULTIPHYSICS ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКА ПРОВОДИМОСТИ ОПН

Ограничители перенапряжений (ОПН) за последние десятилетия стали основным средством защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Эффективность защиты оборудования определяется основными характеристиками варисторов ОПН (ток проводимости, вольт-амперная характеристика), изменения которых как показано исследованиями [1], возникают под действием эксплуатационных факторов.

Величина активной составляющей протекающего тока через варисторную колонку ОПН является тем параметром, определяющим состояние варисторов, повышение значения которого сверх нормальной величины может привести к повреждению аппарата под рабочим напряжением.

Известно, что суммарный ток через ОПН определяется как током проводимости варисторов, так и током утечки по поверхности аппарата, если конструкция ОПН не предусматривает специального изолированного от заземленного фланца ОПН вывода. В многоэлементных ОПН (220 кВ и выше) отсутствие изоляции колонок варисторов относительно промежуточных фланцев приводит к возрастанию тока через варисторы в зависимости от числа сборочных элементов ОПН [2].

В общем случае, при измерениях регистрируется ток, включающий и токи утечки по внутренней и наружной поверхности корпуса ОПН. В условиях загрязнения и увлажнения, ток утечки не только сопоставим с током проводимости, но и может превышать его [3]. Поэтому влияние процессов при увлажнении поверхности ОПН должно быть соответствующим образом учтено.

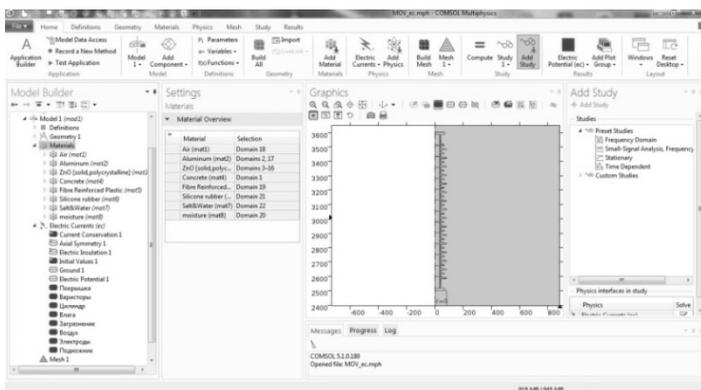


Рис. 1. Модель ОПН в программе COMSOL Multiphysics

Таким образом, задача прогнозирования повреждения ОПН, основанная на существующих методах измерения тока проводимости, технические возможности которых имеют определенные ограничения [4 – 7], усложняется.

Влияние тока утечки и деградации варисторов на величину активной составляющей тока проводимости можно оценить лабораторными исследованиями, а также компьютерным моделированием ОПН.

В работе реализована модель ОПН в программном комплексе Comsol Multiphysics (рис. 1). Она позволяет оценить влияние на полный ток таких факторов, как температура, загрязнение, увлажнение различных элементов ОПН, наличие подсушенных зон на увлажненной поверхности покрывки, деградация варисторов, выраженная в изменении вольт-амперной характеристики, а также величины и гармоник рабочего напряжения.

Для получения активной составляющей тока проводимости использовался алгоритм [8], реализованный в MatLab.

Результаты расчета позволяют говорить об адекватности модели ОПН на основе сопоставления с данными, изложенными в [3].

Библиографический список

1. **Дмитриев В.Л.**, Красавина М.А. «Старение» варисторов в процессе эксплуатации ОПН // Новости электротехники. – 2010. – № 1 (16).
2. **Александров Г.Н.** Ограничение перенапряжений в электрических сетях: учеб. пособие. Издание центра подготовки кадров энергетики. – СПб., 2003.
3. **Дмитриев В.Л.** Влияние загрязнений на поверхности внешней изоляции на достоверность оценки состояния ОПН при периодических обследованиях // Новости электротехники. – 2007. – № 5 (47).
4. **ГОСТ Р 53735.5-2009.** Разрядники вентильные и ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. ч. 5. Рекомендации по выбору и применению.
5. **Васин А.Е.**, Толкачев А.И., Лаврентьев Г.Г. Диагностика рабочего состояния ограничителей перенапряжения // Электро. – 2006. – № 5.
6. **Рыжов С.Ю.**, Минакова Л.В. Проблемы диагностики ограничителей перенапряжения пути их решения // Электротехника. – 2000. – № 7.
7. **Баранник М.Б.**, Барбарович В.Ю., Дмитриев В.Л., Колобов В.В. Особенности контроля состояния ограничителей перенапряжений нелинейных на местах их эксплуатации // Электротехнический рынок. – 2013. – № 1 (49).
8. **Novizon, Zulkurnain Abdul Malek, Aulia.** A New Method To Separate Resistive Leakage Current Of Zno Surge Arrester. – 2008. – No. 29. – Vol. 2.

Ю.Е. Чумаков, Д.С. Сентюрев, студ.;
рук. С.А. Словесный, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕАКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время разработка новых эффективных способов оценки состояния изоляционных конструкций становится все более актуальной, так как надежность практически выработавшего ресурс высоковольтного оборудования зависит, в первую очередь, от состояния его изоляции.

Один из наиболее информативных способов оценки изоляции высоковольтного оборудования базируется на регистрации частичных разрядов (ЧР). Периодически повторяясь, ЧР постепенно разрушают изоляцию, приводят к преждевременному ее старению, поэтому своевременное выявление ЧР и анализ динамики их развития позволяют предотвращать внезапные аварийные ситуации.

Наиболее информативным способом регистрации характеристик ЧР является электрический мостовой способ, позволяющий визуально выделять импульсные сигналы, вызываемые токами ЧР, на фоне электромагнитных помех.

При отстройке мостовой схемы регистрации ЧР от внешних шумов и помех, выполняемого непосредственно перед испытаниями изоляции, в полностью собранную схему установки вводятся электромагнитные возмущения, имитирующие внешнюю помеху.

В период нарастания и спада выходного напряжения имитатора помех в высоковольтную схему установки вводится заряд, представляющий собой эквивалент коронного разряда (помеха). Изменение заряда на высоковольтной шине установки вызывает возникновение высокочастотных затухающих токов помех, проходящих в измерительных элементах моста. Осциллограмма сигнала помехи приводится на рис. 1.

При «растягивании» изображения (изменении временного масштаба) вместо затухающих колебаний видны ломаные линии, проходящие через точки, соответствующие мгновенным значениям измеряемого напряжения.

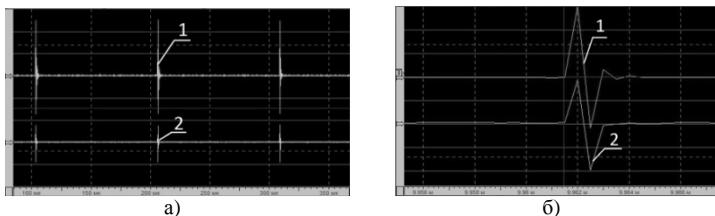


Рис. 1. Осциллограмма сигнала искусственной помехи: общий вид помехи (а), развернутый вид помехи (б): 1 – импульсные напряжения на измерительном элементе, включенном последовательно с объектом контроля; 2 – импульсные напряжения на измерительном элементе, включенном последовательно с соединительным конденсатором

Стробоскопичность (прерывистость) «развертки луча осциллографа» при регистрации импульсных сигналов цифровыми приборами приводит к тому, что часть информации теряется в промежутках между двумя измерениями. Сказанное иллюстрируется кривыми, изображенными на рис. 2.

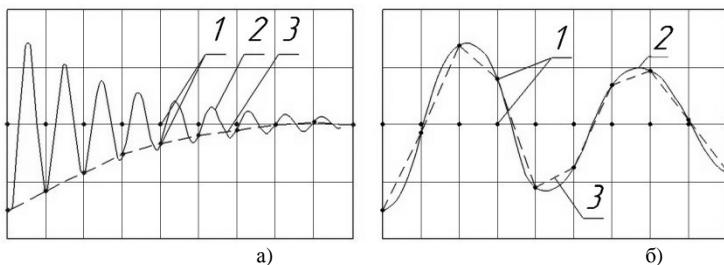


Рис. 2. Иллюстрация работы цифрового осциллографа, при регистрации высокочастотного (а) и низкочастотного (б) периодических импульсных сигналов: 1 – момент регистрации колебаний; 2 – форма исследуемого сигнала; 3 – форма сигнала на экране цифрового осциллографа

Для уменьшения влияния указанной аппаратной погрешности на результаты осциллографирования следует увеличивать или количество измерений в единицу времени (увеличить частоту дискретизации) или увеличивать постоянную времени, измерительного контура схемы регистрации.

В рассматриваемой работе выполнен анализ переходного процесса в схеме измерения, сопровождающего ЧР в изоляции. Установлена зависимость периода собственных колебаний от индуктивности разрядного контура, увеличение которой предлагается для смещения спектра регистрируемых колебаний в низкочастотную область, что способствует снижению ранее указанной аппаратной погрешности.

А.В. Иванова, студ.;
рук. Г.А. Филиппов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г.Иваново)

ДЕФЕКТЫ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ВВОДОВ С БМИ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА И ИХ ОЦЕНКА

В настоящее время трансформаторостроение претерпевает сложный период своего развития. Произошло старение парка трансформаторов и повышение доли высоковольтного оборудования, срок службы которого превышает 25 лет. Основной причиной технологического нарушения, сопровождающегося внутренним коротким замыканием в трансформаторе, являются: пробой внутренней изоляции высоковольтных вводов – 48 %.

Разборка и осмотр около 100 герметичных высоковольтных вводов показали что, в большинстве случаев в нижних фарфоровых покрывках

вводов на их внутренних поверхностях имелся смывающийся желто-бурый осадок разной интенсивности. На верхних крышках осадка не было. У пяти вводов имелись следы по желто-бурому осадку незавершенных ползущих разрядов.

Важный фактор – однотипность сопутствующих признаков: на внутренних поверхностях нижних крышках разрушенных вводов имеется желто-бурый осадок в виде налёта, присутствовали следы поверхностных разрядов; наибольшая интенсивность отказов была в течение 10 лет эксплуатации; пробой внутренней изоляции фиксировался при рабочем напряжении. Таким образом, процессы, приводящие к аварии, определяются рабочим напряжением, температурой.

Исследование механизма нарушения изоляционных свойств в реальных условиях работы вводов крайне сложны. Проведение подобных исследований было признано целесообразным на моделях вводов (по методике ЗАО «Мосизолятор»), которые включали в себя все основные конструктивные элементы герметичного высоковольтного ввода. В результате испытаний было установлено образование желто-бурого налёта на фарфоровых крышках вводов масел ГК и Т-750. Интенсивность осадка с ростом температуры возрастает. Масло Т-750 по интенсивности осадка и $tg\delta$ имеет худшие характеристики по сравнению с ГК. По составу элементов осадки похожи и содержат много серы, которая не была выявлена во входном контроле.

Таблица 1. Результаты испытания моделей с маслом марок Т-750 и ГК при температуре 90° С и напряженности 4,5 кВ/мм (сгруппированы по принципу интенсивности осадка)

Масло	Визуальная интенсивность осадка	Число моделей	tgδ, %		Влагосодержание масла, г/г
			изоляции	масла	
Т-750	Сильная	15	0,35/0,71	0,44/4,6	5,0/15,2
	Средняя	5	0,38/0,95	0,44/14,2	5,0/19,3
	Слабая	4	0,33/0,86	0,44/7,75	5,0/20,5
ГК	Средняя	5	0,3/0,42	0,04/2,1	3,6/9,1
	Слабая	7	0,3/0,53	0,04/4,8	3,6/12,1
	Отсутствует	12	0,34/0,87	0,04/3,58	3,6/15,0

По составу элементов осадки похожи и содержат много серы, которая не была выявлена во входном контроле. Она находилась либо в самом масле, либо была вымыта из резины, используемой для уплотнений. Значение $tg\delta$ на основе фторсиликоновых каучуков по сравнению с резиной типа УМ (универсальная маслостепломорозостойкая) практически не изменилось даже в присутствии медесодержащих материалов, осадка выпало значительно меньше.

Характерным признаком появления осадка являются увеличение тангенса угла диэлектрических потерь наружных слоёв изоляции, иногда превышение предельно допустимых значений. Однако в ряде случаев наблюдается снижение измеренного значения $\operatorname{tg}\delta_1$ (вплоть до отрицательных значений). Это связано как с образованием проводящего жёлто-бурого осадка на внутренней поверхности фарфоровой покрышки герметичного ввода, так и с протеканием паразитных токов. Если измеренное значение уменьшится по сравнению с результатами предыдущих испытаний более чем на $\Delta \operatorname{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-3}$, и будет замечено дальнейшее уменьшение данного параметра, необходим срочный контроль состояния масла.

Библиографический список

1. **Котеленец Н.Ф.**, Акимова Н.А., Антонов М.В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. – М.: Академия, 2003.
2. **Контроль** технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Карандаева О.И. // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – № 26. – С. 28 – 29.
3. **Современные** тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей / Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., Алпатов М.Е. // Известия РАН. Энергетика. – 2008. – № 1. – С. 45 – 69.
4. **Диагностические** признаки для отбраковки вводов высокого напряжения с БМИ / Анисеева М.А., Арбузова Р.С. // Электро. – 2009. – № 1. – С. 22 – 25.
5. **Сборник** методических пособий по контролю состояния электрооборудования / АО «Фирма ОРГРЭС» под ред. Когана Ф.Л. – М., 2001.
6. **Сви П.М.** Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – С. 43 – 58.
7. **Славинский А.З.** Высоковольтные вводы: расчет, конструирование и ремонт – М.: Научтехлитиздат, 2001.

*Е.С. Богданов, С.А. Зенькевич, студ.;
рук. Г.А. Филиппов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ВВОДЫ С RIP- И RIN-ИЗОЛЯЦИЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Одним из важнейших элементов электрических аппаратов высокого напряжения является высоковольтный ввод. От уровня технических характеристик вводов зависит надежность работы энергооборудования и, как следствие, стабильная подача электроэнергии потребителю.

Наиболее часто встречающимися в эксплуатации являются маслona-полненные вводы. Но, несмотря на их высокие электроизоляционные

свойства в процессе эксплуатации происходили пробои изоляции и взрывы высоковольтных вводов с разбросом осколков фарфоровых покрышек на несколько десятков метров, а в ряде случаев и с возникновением пожаров трансформаторов. В связи с этим стоит вопрос о необходимости модернизации изоляции высоковольтных вводов. Химия полимеров позволила создавать более надежные и менее материалоемкие изоляционные конструкции.

RIP-изоляция – это изоляционный материал, полученный на основе высушенной в вакууме и пропитанной эпоксидной смолой крепированной бумаги.

Для выпуска высококачественных конструкций вводов на производстве организованы следующие технологические процессы: предварительная сушка крепированной бумаги, намотка изоляционного остова, термовакуумная сушка остова, герметизация поверхности остова, дегазация остова в технологической пропиточной камере, заполнение остова предварительно дегазированным компаундом под вакуумом, пропитка остова компаундом, отверждение компаунда под давлением, освобождение твердого остова из пропиточной камеры.

Вводы с RIP-изоляцией помимо явных преимуществ относительно маслonaполненных вводов, таких, как уменьшение затрат при эксплуатации, любой угол установки, низкие диэлектрические потери, низкая интенсивность ЧР, взрывобезопасность и экологическая безопасность, имеют и недостатки, главный из которых заключается в том, что даже термовакуумная пропитка эпоксидным компаундом не устраняет полностью гигроскопичность бумаги.

С целью увеличения стойкости твердой изоляции к действию влаги и тяжелых условий эксплуатации вводов, решили заменить крепированную бумагу, которая обладает высокой гидрофильностью и рельефной поверхностью. Для изготовления новой изоляции типа RIN используется гладкий полимерный нетканый материал, который обладает хорошими водоотталкивающими свойствами и может легко пропитываться электроизоляционным компаундом.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что RIN-изоляция является наиболее эффективным видом изоляции, который имеет следующие преимущества: высокая гидрофобность поверхности изоляции, стойкость к атмосферному воздействию, малые размеры, низкая масса, высокие электрические характеристики, лучшее распределение электрического поля в изоляции, сокращение технологического процесса, сокращение сроков изготовления.

Такие вводы находятся в опытной эксплуатации с 2010 года, что показывает их соответствие требованиям международных стандартов IEC (International Electrotechnical Commission).

Библиографический список

1. **Ботов С.В.** Особенности организации защиты и мониторинга трансформаторных вводов с RIP-изоляцией // Энергоэксперт: Информационно-аналитический журнал для специалистов в области электроэнергетики и электротехники. – 2011. – № 6.
2. **Овсянников А.Г.** Проблемы эксплуатации и диагностирования вводов с RIP-изоляцией // Энергоэксперт: Информационно-аналитический журнал для специалистов в области электроэнергетики и электротехники. – 2014. – № 3.
3. **Славинский А.З.** Российский высоковольтные вводы: более 80 лет истории // Электрические станции. – 2015. – № 2.
4. **Славинский А.З.** Высоковольтные вводы для масляных выключателей с RIN-изоляцией. – ООО «МАССА», 2009.
5. **Славинский А.З.** Высоковольтные вводы: расчет, конструирование и ремонт. – Научтехлитиздат, 2001.

Содержание

Секция 12. Электрические системы

Рожков А.Н. Разработка и исследование алгоритмов управления регулятором фазо-поворотного устройства с полупроводниковым коммутатором для работы в условиях установившегося режима энергосистемы; рук. Панфилов Д.И., Новиков М.А.	3
Билалова А.И. Прогноз электропотребления в г. Ульяновск; рук. Доманов В.И.	4
Седойкин Д.Н. Общие принципы построения адаптивных систем автоматического управления возбуждением синхронного генератора на основе нечеткого аппроксиматора; рук. Юрганов А.А.	6
Вуколов В.Ю. Оптимизация режимов распределительных сетей 6 – 35 кВ с использованием синхронизированных измерений	8
Филимонов Н.Ю. Полная математическая модель автоматического регулятора возбуждения АРВ-РЭМ 700; рук. Юрганов А.А.	10
Попов В.А., Родэ Д.И. Оптимизация режимов работы ГЭС; рук. Толстихина Л.В.	12
Разумец Е.А., Федчишин В.В. Влияние климатических факторов на параметры электрических сетей высокого напряжения; рук. Кудряшев Г.С.	14
Макаров А.П., Елкин А.В., Мелешкова Л.В. Исследование методов расчета установившихся и переходных режимов электроэнергетической системы; рук. Сенько В.В.	15
Мышкина Л.С. Распределенная энергосистема – основа системы электроснабжения; рук. Бык Ф.Л.	17
Андреенков Е.С. Компенсация погрешностей трансформаторов напряжения; рук. Артемов А.И.	20
Редькин А.О. Система обнаружения поврежденных изолирующих подвесок в сетях 110 – 500 кВ.; рук. Титов Д.Е.	22
Никифоров К.С., Саватеев Д.А. Анализ альтернативных вариантов строительства воздушной линии 220 кВ «Братская ГЭС-Подстанция НПС-4»; рук. Яковкина Т.Н.	24
Муканина А.А. Интегрированные системы энергоснабжения в составе виртуальных электрических станций; рук. Суслов К.В.	25
Винников В.А. Математическая модель газотурбинной установки; рук. Суслов К.В., Герасимов Д.О.	27
Журавлева И.А., Сухоручкина Т.Ю. Применение проводов нового поколения на больших переходах воздушных линий электропередачи; рук. Шевченко Н.Ю.	29
Сороко В.В. Расчет статики и динамики проводов с учетом демпфирующих устройств; рук. Бладыко Ю.В.	31
Петров М.И. Исследование режимов работы индуктивно-емкостного МУПК; рук. Рашитов П.А.	33
Чернышев А.А. Разработка последовательного регулятора потока мощности для воздушной линии электропередачи на основе СТАТКОМа; рук. Панфилов Д.И.	35
Расули К.В. Исследование и разработка последовательных источников реактивной мощности для регулирования токовой загрузки ЛЭП; рук. Чаплыгин Е.Е.	37
Ангельчева В.П., Кузнецов Н.Г. Анализ характеристик компактных линий электропередачи; рук. Бушуева О.А.	38
Беляев П.Н. Исследования влияния полноты математического моделирования ЭЭС на оценку её статической устойчивости; рук. Братолобов А.А.	40
Брындин А.А. Исследование статической устойчивости методом численного интегрирования нелинейных уравнений ЭЭС; рук. Братолобов А.А.	42
Новиков В.А., Виноградова Д.С. Определение параметров трёхфазных двухцепных линий электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений; рук. Иванов И.Е.	44

Журавлев И.Д. Развитие автоматики предотвращения нарушения устойчивости Костромской ГРЭС; рук. Мурзин А.Ю.	46
Зотова М.В., Смирнов Е.В., Смирнова А.Г. Нормальные и аварийные режимы экранов однофазных высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена; рук. Мартиросян А.А.	48
Комухов А.А., Кустикова М.С., Москвин И.А. Влияние устройства продольной компенсации с тиристорным управлением на качество напряжения; рук. Мартиросян А.А., Голов В.П.	50
Кормилицын Д.Н. Влияние управляемых шунтирующих реакторов на устойчивость электроэнергетической системы с управляемой продольной компенсацией; рук. Голов В.П.	52
Кравченко М.И. Исследование устойчивости электроэнергетической системы, содержащей элементы активно-адаптивной сети; рук. Москвин И.А.	53
Кустикова М.С., Комухов А.А., Москвин И.А. Регулирование напряжения с помощью статического тиристорного компенсатора; рук. Мартиросян А.А.	54
Новиков А.А. Проблема наведенного напряжения в отключенных воздушных линиях; рук. Братолобов А.А.	56
Сидоров А.В. Создание программы Win_SSS; рук. Москвин И.А.	58
Фирстов П.Е. Зависимость значений токов коротких замыканий на электропередачах от закона регулирования устройства продольной компенсации; рук. Мурзин А.Ю.	60
Фоменко Н.А. Обеспечение электромагнитной безопасности линий электропередачи; рук. Мурзин А.Ю., Словесный С.А.	61
Михайлюк А.А., Мольков Н.С., Неумоин А.Д., Чуркина Ю.О. Моделирование установившихся и переходных режимов электроэнергетической системы с двумя электрическими станциями; рук. Мартиросян А.А.	62
Alexander A. Novikov Issue of Induced Voltage in De-Energized Overhead Lines; рук. Alexander A. Bratolyubov, Anna A. Egorova	63
Вилсон М. Обзор альтернативных источников энергии; рук. Кулешов А.И.	65
Выборнова Е.А. Исследование математических моделей режимов электрической сети; рук. Кулешов А.И.	67
Морыганов А.Е. Феррорезонансные явления в электрических сетях; рук. Огорельшев Н.А.	69
Введенский Н.Е., Казарин А.С. Улучшение устойчивости электроэнергетической системы с использованием комплексного управления управляемого устройства продольной компенсации и управляемых шунтирующих реакторов; рук. И.А. Москвин	71
Никитина С.Д. Управляемая продольная компенсация ЛЭП СВН для повышения предела передаваемой мощности при изменении мощности шунтирующих реакторов; рук. Д.Н. Кормилицын	72

Секция 13. Электроснабжение

Назаров М.Х., Султонов Ш.М. Система автоматического регулирования частоты автономной микроГЭС; рук. Секретарев Ю.А.	75
Ачитаев А.А. Исследование магнитной трансмиссии в составе автономной энергетической системы в целях стабилизации частоты вращения; рук. Приступ А.Г., Сапсалева А.В., Удалов С.Н.	77
Джураев Ш.Дж. Оценка качества электроэнергии в энергосистеме Республики Таджикистан; рук. Тульский В.Н.	78
Андреева К.С., Заболотько С.А. Экспериментальная оценка динамических свойств источника питания электрической дуги; рук. Мякишев В.М.	80
Калечиц В.Н. Особенности выбора сечения проводников осветительной линии с двусторонним питанием; рук. Козловская В.Б.	83

Воробей В.В. К обоснованию применения собственных генерирующих источников на промышленных предприятиях; рук. Радкевич В.Н.	85
Дворянчиков И.В., Аверьянова К.С. Исследование показателей качества электрической энергии в электросетях нефтепромысловых районов; рук. Степанов В.П.	87
Тюндина Т.Е. Работа симметрирующего устройства с демпфирующим резистором в распределительных сетях 0,38 кВ; рук. Дулепов Д.Е.	88
Ахметшин А.Р. Повышение качества электроэнергетики с помощью симметрирующих трансформаторов; рук. Федотов А.И.	91
Петрусёв А.С. Построение энергоэффективной системы электроснабжения на основе солнечных установок; рук. Лукутин Б.В.	93
Елисеичев Е.А. Блочно-модульный импульсный источник питания с прецизионным авторегулированием электрических параметров; рук. Манин А.В.	95
Салихов А.Ф. Анализ показателей светильника при замене люминисцентных ламп на светодиодные; рук. Гусячкин А.М., Игошин В.А.	96
Павлюк Е.Ю. Разработка системы автономного электроснабжения и системы управления для проекта «Энергоэффективный дом»; рук. Яковкина Т.Н.	97
Киричев А.В. Стенд для проведения исследовательских испытаний экспериментальных образцов фотоэлектрических модулей на основе кристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей; рук. Цепилов Г.В.	99
Сторожев С.В. Система автоматического управления в сетях наружного освещения северных городков; рук. Тишков А.А.	101
Красковский И.А. Повышение энергоэффективности систем освещения зданий; рук. Марьясин О.Ю.	103
Брындин А.А., Харьков А.О. Снятие статических характеристик асинхронного двигателя; рук. Полкошников Д.А.	105
Иванова Н.С. Анализ режимов работы ускорителя института физики высоких энергий (ИФВЭ); рук. Бушуева О.А.	106
Любимова А.О. Об эффективности и перспективах использования автоматизированной системы управления наружным освещением; рук. Соколов М.И.	108
Мухин А.И., Ивашина А.Н., Смирнова А.С. Повышение энергетической эффективности объектов за счет рациональной организации учета электроэнергии и внедрения автоматизированных систем; рук. Шульпин А.А.	110
Павлова З.В. Распределенная генерация в системах электроснабжения города; рук. Бушуева О.А.	112
Попова Е.А. Определение загрузки существующих элементов городской электрической сети; рук. Балдов С.В.	113
Прокопьев И.В. Использование физического и математического моделирования при оптимизации режима замкнутой распределительной электрической сети; рук. Аржанникова А.Е.	115
Сотчева Р.С., Захаров Н.Е., Медведев А.А. Электросбережение на энергетических объектах; рук. Шульпин А.А.	117
Чистякова А.В. Использование современных информационных технологий при оптимизации структуры и режима системы электроснабжения; рук. Аржанникова А.Е.	119
Bryndin A.A., Hristolyubsky A.V., Harkov A.O. Experimental Research of Steady-State Lighting Load Characteristics; рук. Polkoshnikov D.A., Egorova A.A.	121
Секция 14. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем	
Иванова В.Р. Повышение чувствительности дифференциальных защит линий при внутренних коротких замыканиях; рук. Иванов И.Ю.	124
Ефремова И.Ю., Ефремов Д.Г. Управляемая настройка пускового органа противоаварийной автоматики; рук. Глушкин И.З.	126

Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю. Повышение динамической устойчивости станции с помощью использования накопителей энергии; рук. Глускин И.З.	128
Речков А.В., Абрамов А.В., Зухрабов З.Г. Структурная схема релейной защиты гидроагрегата; рук. Носков М.Ф.	130
Дементьев С.С. Нейрокомпьютерная система мониторинга гололедообразования на воздушных линиях электропередачи; рук. Шилин А.А.	131
Хиневич А.Г. Тестирование программного комплекса «Режимы трехфазного трехобмоточного трансформатора»; рук. Новаш И.В.	133
Кожуховский И.С., Калугин Д.А. Алгоритм управления силовыми выключателями; рук. Носков М.Ф.	135
Ежиков Н.И., Климов Е.И. Система непрерывного анализа токов; рук. Павлоков В.С.	137
Гийев Б.М. Разработка устройство автоматического включения агрегатов бесперебойного питания; рук. Додхудоев М.Д.	138
Глазачев А.А. Внедрение современной автоматизированной системы управления технологическим процессам на подстанции; рук. Белоглазов А.В.	140
Сидорова А.В. Сравнительный анализ аварийности в сетях 6...35 кВ при наличии и отсутствии дугогасящих реакторов; рук. Целебровский Ю.В.	142
Колмогоров Д.О. Анализ аварийности сетей 6-10-35-110 кВ; рук. Целебровский Ю.В.	144
Андреевков Е.С. Оценка класса точности измерительных трансформаторов напряжения при нелинейной нагрузке вторичной цепи; рук. Артемов А.И.	145
Филатова Г.А. Параметрический способ определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ; рук. Шуин В.А.	147
Нечаев Е.В. Разработка электронного блока питания, установленного на первичном проводе высоковольтного оборудования, для цифровых измерительных трансформаторов; рук. Лебедев В.Д.	149
Борисова А.Н. Моделирование силового трансформатора для исследования дифференциальной защиты; рук. Фролова О.В., Шуин В.А.	151
Комлев Д.М. Гибридный аналогово-цифровой трансформатор тока с компенсацией погрешностей, вызванных насыщением магнитопровода; рук. Алексинский С.О.	153
Аземша Д.И. Разработка графического интерфейса для программы расчета токов короткого замыкания в целях релейной защиты; рук. Фролова О.В.	154
Шадрикова Т.Ю. Повышение технического совершенства максимальной токовой защиты от однофазных замыканий на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6 – 10 кВ; рук. Шуин В.А.	157
Румянцев И.Н. Модернизация лабораторных стендов для освоения учебных курсов и проведения исследований по релейной защите и автоматике; рук. Лебедев В.Д., Куванов А.В.	159
Воробьева Е.А. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в а-, b-, 0-составляющих; рук. Добрягина О.А., Шуин В.А.	160
Святлов А.А., Святлов А.А. Разработка усилителя для проведения экспериментальных исследований цифровых измерительных трансформаторов напряжения; рук. Лебедев В.Д.	162
Смирнов В.А. Исследование и сравнительный анализ алгоритмов цифровой обработки информации; рук. Лебедев В.Д.	164
Лебедева Н.В. Исследование частотных свойств первичных высоковольтных преобразователей напряжения, предназначенных для современных микропроцессорных устройств релейной защиты и измерений; рук. В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков	166
Лылов П.В. Разработка и исследование системы передачи оцифрованных значений токов и напряжений на подстанции; рук. Лебедев В.Д., Фомичев А.А.	168

Меркулов А.Ю. Применение микроконтроллера на плате DK55 с микросхемой SC24-IEC для организации передачи цифровой информации по протоколу МЭК 61850; рук. Лебедев В.Д., Яблоков А.А. 169

Секция 15. Электротехника и электротехнология

- Аль-Шахейти А. Электромагнитный подшипник, активный магнитный подвес; рук. Евдокимов Ю.К. 172
- Синицин А.М. Методика измерения параметров термоэлектрических материалов на основе теллурида свинца; рук. Уланов В.А. 173
- Кожеко А.С. Расчет оптимального диапазона включения агрегатов; рук. Толстихина Л.В. 174
- Кузнецов А.А., Кожеко А.С., Белоконов П.М. Средства обеспечения оптимального уровня надежности и безопасности интеллектуальной энергетической системы; рук. Носков М.Ф. 176
- Гордеев Е.С. Влияние величины сетевого напряжения на режим работы СВЧ генератора с пакетированным магнетроном; рук. Артюхов И.И. 177
- Галиев Р.М. Усовершенствованная конструкция ветрогенератора с вертикальной осью вращения; рук. Ахметшин Р.С., Насибуллин Р.Т. 179
- Гаврилова С.В., Михайлов Э.И. Исследование согласованного режима работы асинхронных двигателей; рук. Доманов В.И. 181
- Синев Ф.В. Повышение энергоэффективности автономных ветродизельных установок; рук. Филимонова О.В. 183
- Сандаков В.Д., Подрезов А.Н. Применение монокристаллов для повышения эффективности очистки газовых сред; рук. Валеев И.М. 185
- Танаев А.В. Распространение электромагнитной волны в двухслойной проводящей среде; рук. Проценко А.Н. 187
- Танаев А.В. Распространение электромагнитной волны в двухслойной проводящей среде (продолжение); рук. Проценко А.Н. 189
- Старостина Я.К. Пуско-регулирующее устройство на диодно-транзисторном модуле; рук. Сидоров С.Н. 191
- Евдаков А.Е. Математическое моделирование динамических режимов работы цепей, содержащих нелинейные электромагнитные устройства; рук. Мартынов В.А. 193
- Самсонов А.В. Исследование влияния рабочей частоты на резонансные явления в инверторных источниках питания; рук. Куликов К.В. 195
- Шапина Ю.О. Моделирование индукционного нагрева ферромагнитных материалов с учётом кривой намагничивания; рук. Долгих И.Ю. 197
- Алейников А.В. Формирование токов многофазного магнитоэлектрического электропривода с улучшенными виброшумовыми характеристиками; рук. Мартынов В.А., Голубев А.Н. 198
- Карачёв В.Д. Улучшение виброшумовых показателей многофазного синхронного электропривода; рук. Голубев А.Н., Мартынов В.А. 200
- Судакова Д.А. Численные исследования магнитоэлектрического герметизатора возвратно-поступательного движения; рук. Сайкин М.С. 202
- Баженов В.С. Разработка магнитоэлектрического герметизатора для вращающихся валов жидких сред; рук. Сайкин М.С. 203
- Демиденко О.В. К вопросу проведения ресурсных испытаний магнитоэлектрических герметизаторов; рук. Сайкин М.С., Филатова М.В. 204
- Морозова Д.Ю. Physical experiment to determinate the force of suspension of magnetic fluid sensor angle sensitive element; рук. Сайкин М.С. 206
- Долгих И.Ю. Совершенствование методов стыковой сварки на основе использования плоских индукторов; рук. А.Н. Королёв 208

Секция 16. История электротехники

Пушкарева М.С., Шибачев Ю.С. История развития и перспективы использования передачи электроэнергии на постоянном токе; рук. Чекан Г.В., Сайкин М.С.	210
Туренкова Е.Н. Истоки атмосферного электричества; рук. Королёв А.Н.	212
Бобров И.В. История исследования атмосферного электричества; рук. Сайкин М.С.	214
Кутумов Ю.Д. Павел Николаевич Яблочков и Александр Николаевич Лодыгин: изобретатели, дарившие людям свет; рук. Сайкин М.С.	216

Секция 17. Электрооборудование и режимы электрических станций и подстанций

Панова Я.В. Получение ситуационных оценок эксплуатационного состояния гидроагрегатов; рук. Секретарев Ю.А.	219
Дьяков А.Ю. Особенности проектирования гидроэлектростанций в Сибири; рук. Затеева Ю.В.	220
Султонов Ш.М., Назаров М.Х. Краткосрочная оптимизация режимов ГЭС энергосистемы Таджикистана; рук. Секретарев Ю.А.	222
Веселова В.В. Проблемы развития генерирующих мощностей на севере Забайкальского края; рук. Шакиров В.А.	223
Страхов А.С. The Development of Health Monitoring Techniques of the Induction Motors in Russia and Abroad; рук. Прохорова А.А., Скоробогатов А.А.	225
Сахаров А.М., Кофтаев Н.С., Назаров А.О. Сравнение эффективности систем охлаждения синхронных генераторов; рук. Калачева О.Н.	227
Наумов С.А., Любимова М.Е., Перцев Д.А. Вакуумный выключатель ВРС-110; рук. А.В. Рассказчиков	229

Секция 18. Высоковольтная электроэнергетика и электротехника

Козловский А.Л. Модификация электрических свойств Fe/Co нанотрубок; рук. Кадыржанов К. К.	232
Ерёменко И.С. Экранирование трубопроводов для снижения влияния воздушных линий; рук. Мюльбаер А. А.	234
Толопа А.С., Кулешов А.В., Устюжанин М.А. Экспериментальное моделирование потенциалоповышающего тока заземляющего устройства подстанций; рук. Мюльбаер А. А.	235
Калугин Д.А., Кожуховский И.С., Гераськин Н.А. Применение способа электроразрядного откола от монолита и разрушения негабаритов в гидротехнических сооружениях ГЭС; рук. Носков М.Ф.	237
Бойко Н.В. Исследование особенностей работы высоковольтных выключателей на основе силовой полупроводниковой техники; рук. Петрова Н.Ф.	239
Мещеряков В.Е. Расчет грозопоражаемости наземных объектов; рук. Шишигин С.Л.	241
Наталич М.С. Методики расчета электрического поля ВЛ в зоне полета БПЛА; рук. Качесов В.Е.	243
Федюкова А.А. Разработка технических требований к ультракомпактным воздушным линиям высокого напряжения; рук. Лавров Ю.А.	245
Чесалина Я.Р. Разработка конструкции сухих концевых муфт 110 кВ; рук. Лебедев И.А.	246
Лосев Д.Ю. Воздействие электрических полей промышленной частоты на организм человека; рук. Хасанова О.Т.	248
Какурин Д.А. Оценка перспективы использования однопроводной резонансной электропередачи Тесла; рук. Войтович Р.А.	250
Яблонский А.В. Измерение магнитного поля под воздушной линией для определения ее параметров; рук. Шевченко С.С.	251

Кох А.В. Разработка лабораторного стенда по исследованию электромагнитного экранирования; рук. Шевченко С.С.	253
Балобанов Р.Н. Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции; рук. Зарипов Д.К.	255
Ванчагов П.А. Исследование грозовой активности на территории Томской области; рук. Шевченко С.С.	256
Тютин Р.И. Исследование грозовой обстановки вдоль высоковольтной линии; рук. Шевченко С.С.	258
Агуревнин П.Д. Регистрация высокочастотных перенапряжений во вторичных цепях подстанции Мельниково 110 кВ; рук. Шевченко С.С.	259
Либрихт И.В. Электромагнитная совместимость измерительной техники с высоковольтным оборудованием; рук. Шевченко С.С.	261
Когай М.В. Определение оптимального шага расщепления; рук. Шевченко С.С.	262
Петров Н.Н., Наведенное напряжение на воздушной линии при близком ударе молнии; рук. Евдокунин Г.А.	263
Пантелеева К.С. Анализ перспектив развития твердой изоляции силовых масляно-полненных трансформаторов; рук. Гарифуллин М.Ш.	265
Блинова К.Ю. Система контроля изоляции трансформаторов высших классов напряжения (СКИТ); рук. Шишкова Л.И.	266
Крестинков В.Г., Семенов Д.А., Устройства диагностики и мониторинга электрической изоляции; рук. Серебряков А.С.	268
Савчук Н.А., Курьяков Е.В. Заземляющее устройство для защиты от шагового напряжения; рук. Хромов В.В.	270
Акульшина М.В., Шуркина А.Ю. Особенности испытания главной изоляции индуктированным напряжением; рук. Баженов О.А.	272
Назаров А.Г. Особенности пересчёта пробивных напряжений трансформаторного масла с малых образцов на большие; рук. Митькин Ю.А.	274
Новикова А.С., Танкой А., Соболев А.Ю. Диагностика кабельной изоляции локационным методом; рук. Воробьев В.Ф.	276
Бачурина А.Д. Разработка программного комплекса для расчета разветвленной высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты; рук. Шадриков Т.Е., Соколов А.М.	278
Дьячков А.А. Исследование аварийных режимов работы высоковольтной кабельной электропередачи повышенной частоты; рук. Шадриков Т.Е., Соколов А.М.	280
Бабурин И.В., Софьина М.Э. Применение Comsol Multiphysics для оценки тока проводимости ОПН; рук. Тихов М.Е.	281
Чумаков Ю.Е., Сентюрев Д.С. Оценка влияния реактивных параметров схемы измерения на результат регистрации частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования; рук. Словесный С.А.	283
Иванова А.В. Дефекты изоляции высоковольтных герметичных вводов с БМИ конденсаторного типа и их оценка; рук. Филиппов Г.А.	285
Богданов Е.С., Зенькевич С.А. Высоковольтные вводы с RIP- и RIN-изоляцией и перспективы их использования; рук. Филиппов Г.А.	287

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ЭНЕРГИЯ-2016»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

*Составители Макаров А.В., Шадриков Т.Е.
Компьютерная верстка Фомичевой А.В.
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.
Подписано в печать 31.03.2016. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,32.
Тираж 100 экз. Заказ № .
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.