

ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ЭНЕРГИЯ-2017

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

4-6 апреля 2017 г.
г. Иваново

ТОМ 3

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

Академия электротехнических наук РФ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

«ЭНЕРГИЯ-2017»

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

ИВАНОВО, 4 – 6 апреля 2017 г.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 3

ИВАНОВО

ИГЭУ

2017

УДК 620 + 621

ББК 31

Э 45

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА // Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2017. – 310 с.

ISBN 978-5-00062-232-2

ISBN 978-5-00062-236-0

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 **С.А. СЛОВЕСНЫЙ**, 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., ст. преподаватель **Аржанникова А.Е.**

*Н.С. Карнаухов, маг.,
К.В. Бунас, студ.;*
рук. А.Г. Капустин, к.т.н., доц.
(БГАА, г. Минск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы – решение вопросов повышения качества электроэнергии путем реализации интеллектуальной системы регулирования напряжения в цифровых системах управления. Это позволяет получить более высокое качество электроэнергии по сравнению с современными регуляторами напряжения и с требованиями ГОСТ Р 54073–2010 и MIL-STD-704F. Под качеством электроэнергии понимаются следующие показатели: время регулирования, статическая ошибка регулирования, величина перерегулирования.

В данной работе используется математическая модель нейронной сети, построенная на базе простой концепции строения нейрона. При построении нейронных сетей используется множество простых вычислительных элементов, называемых нейронами, каждый из которых имитирует поведение отдельной клетки человеческого мозга. Принято считать, что человеческий мозг – это естественная нейронная сеть, а модель мозга – это просто нейронная сеть. Каждый нейрон в нейронной сети осуществляет преобразование входных сигналов в выходной сигнал и связан с другими нейронами. Входные нейроны формируют так называемый интерфейс нейронной сети. Информация вводится в нейронную сеть через входной слой. Внутренний слой нейронной сети обрабатывает эти сигналы до тех пор, пока они не достигнут выходного слоя [1].

В процессе работы проводились исследования эффективности современных и интеллектуальной систем регулирования напряжения в среде высокоуровневого интерпретируемого языка программирования MATLAB при различных возмущениях.

Разработаны математические и виртуальные модели в среде высокоуровневого интерпретируемого языка программирования MATLAB: авиационного трехфазного синхронного генератора типа ГТ мощностью 30 кВ·А; современных систем регулирования напряжения; интеллектуальной систем регулирования напряжения [2, 3]. Проведены исследования переходных и установившихся режимов при различных коммутациях нагрузок, а также оценены показатели качества электроэнергии данных систем при различных параметрах оптимальной интеллектуальной системы регулирования напряжения (времени запаздывания t_z и периода квантования T по времени) [1, 3].

Анализ результатов моделирования показал, что длительность переходных процессов при реализации интеллектуальной системы регулирования напряжения генератора мощностью 30 кВ·А сократится до $(10 - 20) \cdot 10^{-3}$ с при одновременном уменьшении диапазона изменения напряжения до (109 – 120) В при использовании интеллектуальной системы регулирования напряжения. Таким образом, наиболее эффективной системой регулирования напряжения с точки зрения качества электроэнергии является интеллектуальная система регулирования напряжения [1].

Разработана структурная схема цифровой интеллектуальной системы регулирования напряжения включает в себя следующие элементы: трансформаторы тока (3 шт.); преобразователи напряжения 115 В в 5 В (3 шт.); аналого-цифровые преобразователи АЦП (6 шт.); микроконтроллеры МК1 и МК2 серии ATMEGA 640 (2 шт.); преобразователь напряжения 27 В/5 В; преобразователь напряжения 27 В/15 В; преобразователь напряжения 27 В/9 В; цифро-аналоговый преобразователь; промежуточный усилитель; прецизионный источник питания; силовой транзистор. Система была промоделирована в среде виртуального моделирования Proteus. Также была составлена 3D-модель системы регулирования напряжения.

Библиографический список

1. **Карнаухов, Н.С.** Система регулирования напряжения авиационного генератора переменного тока с элементами искусственного интеллекта / Н.С. Карнаухов // Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации космонавтики», 16 – 20 ноября 2015 г.: сборник аннотаций работ. – М.: МАИ(НИУ), 2014. – 307 с.
2. **Карнаухов, Н.С.** Использование среды MatLab для создания, исследования и настройки виртуальных моделей авиационного электропривода / Н.С. Карнаухов, А.Г. Капустин // Компьютерные измерительные технологии: материалы I Международного симпозиума. – М.: ДМК Пресс, 2015. – С. 244 – 246.
3. **Карнаухов, Н.С.** Роль и место регуляторов напряжения в электроэнергетическом комплексе воздушных судов концепции All electric aircraft / Н.С. Карнаухов, А.Г. Капустин // Ежемесячный научно-практический журнал «Изобретатель». – 2015. – 5 (185). – С. 41 – 48.

А.К. Власов, студ.;
рук. Ю.П. Максимов, к.т.н., доц.
(ВлГУ, г. Владимир)

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Создание в России электроэнергетического рынка вызвало необходимость рассмотрения проблем управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС). Пересматривается и теоретическая база разработки задач управления нормальными режимами. Начиная с 30-х гг. XX в. в области управления режимами ЭЭС выполнено очень много работ. Однако свойства систем энергетики изменились. Почти двадцатилетний опыт работы в новых условиях показывает, что эффективность решения режимных задач по техническим индикаторам очень низкая.

Известные ученые (Д.А. Арзамасцев, В.А.Веников, В.М. Горнштейн, Л.А. Мелентьев и др.) заявляли, что единой теории управления режимами ЭЭС не существует и можно говорить только о принципах, которыми необходимо руководствоваться при решении конкретных задач. Теория базируется на процессе научного познания и включает четыре основных блока. Первый блок – методология и принципы управления. В нем отражены методы научного познания, которые применяются при исследовании энергетических систем, в том числе и режимов ЭЭС. Второй блок – модели, методы и информационные технологии решения режимных задач. Третий блок – принятие решений по управлению режимами. Очень важную роль играет четвертый блок – адаптивность. Блок адаптивности является обратной связью между выходом и входом как для отдельных концептуальных блоков, так и в качестве цепочечной связи от любого последующего блока к предыдущему.

Громадное значение при теоретических и прикладных разработках имеют возможности компьютерных систем. Современная вычислительная техника радикально отличается от той, на которой в СССР выполнялись основные исследования по управлению режимами, она позволяет решать задачи управления на новом научном уровне. Сегодня компьютерные системы – это не только инструментарий расчетов, а это инновационная идеология интеллектуального управления.

Основной концепцией детализации свойств и задач систем является использование кибернетических методов управления на основе компьютерных систем. Применение кибернетики – это чрезвычайно широкое научное направление.

В кибернетических системах применяются главным образом модели задач, в которых не раскрывается суть задачи и особенности системы.

А главное – это исследование поведения системы. Система рассматривается как некий преобразователь, имеющий вход и выход.

Задача расчета режимов с использованием метода «электрического эквивалента». Снижение потоков стоимости для каждого из объектов – требует получения стоимостных характеристик вида $St(Z)$. При этом поток стоимости выполняет функцию координирующих воздействий. Вектор режимных параметров (Z) становится по сути вектором, характеризующим технико-экономическое состояние системы, и должен включать не только технические (X, Y), но и стоимостные (St) параметры, следовательно, $Z(X, Y, St)$. При таком подходе все энергетические свойства генерирующих компаний (ГК) и экономические показатели генерирующих и сетевых компаний (СК) могут учитываться активными сопротивлениями, что позволяет применять программы расчета нормальных режимов ЭЭС.

Задача адресных расчетов потоков мощности и электроэнергии и их трасс. В этой задаче по матрицам токораспределения моделируются трасса и определяются индивидуальные балансы для покупки/продажи электроэнергии и мощности.

Задача многокритериальной оптимизации режимов. При оптимизации режимов используются различные критерии, которые зависят от объекта, целей управления, видов рынков и правил, установленных для энергетических объектов.

Библиографический список

1. **Автоматизация** управления энергообъединениями / под ред. С.А. Савалова. – М.: Энергия, 1979. – 422 с.
2. **Оптимизация** режимов электростанций и энергосистем / Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. –М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
3. **Русина А.Г.** Разработка модели электрического эквивалента и принципов адресного распределения потоков и потерь мощности электроэнергетической системы: – Новосибирск, 2006. – 157 с.
4. **Инновационный** подход к решению режимных задач при управлении электроэнергетическими системами / М.Ш. Мисриханов, А.Г. Русина // Вестник ИГЭУ. – 2012. – 6 с.

Д.Ю. Лосев, маг.;
рук. К.Р. Аллаев, д.т.н., проф.
(ТГТУ, г. Ташкент)

ТЕХНОЛОГИЯ ВЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Недавно появились новые подходы к исследованиям систем автоматического управления на основе матричных методов. Были разработаны

новые конструкции матриц, такие как делители нуля и канонизаторы, позволяющие раскрывать новые возможности анализа и синтеза линейных динамических систем, имеющие численное и алгоритмическое преимущества исследований перед традиционными.

Технологией вложения систем названа универсальная совокупность методов и приёмов решения задач теории систем, основанная, прежде всего, на современных достижениях алгебры и сводящаяся к определению условий, при которых сложно организованная система ведёт себя аналогично относительно более простой, доступной для глубокого исследования системы [1].

Технология вложения систем обладает следующими особенностями [2]:

- ориентирована на аналитические исследования и синтез линейных многосвязных систем;

- учитывает широкий спектр структурных свойств, такие как полюсы, все типы нулей, алгебраические особенности, исследуемой или синтезируемой линейной системы;

- предоставляет возможность получения всего множества эквивалентных, неразличимых по постановки задачи, результатов анализа или синтеза линейных стационарных динамических систем, если искомое решение и не является единственным.

Технология вложения систем предполагает последовательное выполнение трёх этапов. Рассмотрим этапы применения технологии вложения систем [3].

1. На первом этапе формализуется общая структура исследуемой или синтезируемой системы. Это осуществляется приведением математических моделей всех подсистем и связей между ними к матрице специальной конструкции – проблемной матрицы (проматрицы) $\Omega(p)$ решаемой задачи. Проматрица всегда имеет квадратный вид и является обратимой. Если вычислить обратную к проматрице матрицу получим реверсивную проблемную матрицу (репроматрицу) $\Omega^{-1}(p)$, которая будет содержать все возможные передаточные функции линейной динамической системы. Поэтому проматрица является единственным объектом исследования, который исчерпывающим образом характеризует все свойства линейной динамической системы.

2. На втором этапе формируется так называемое тождество вложения, которое устанавливает выборочную эквивалентность исследуемой системы и некоторой другой системы – образа $\omega(p)$, обладающей известной или желаемой совокупностью свойств. Речь идёт о фрагментарном отождествлении репроматрицы $\Omega^{-1}(p)$ и образа $\omega(p)$:

$$\beta \Omega^{-1} \alpha = \omega, \quad (1)$$

которое, собственно, и дало название технологии. Здесь α и β в общем случае полиномиальные матрицы требуемого размера, ω – образ исследуемой системы.

3. На третьем этапе осуществляется переход от тождества вложения к расчётным формулам. По виду матриц α , β и ω составляются матричные уравнения, решение которых либо не существует, либо требует выполнения тех соотношений, которые являются этим решением.

В случае заданной скалярной дробно-полиномиальной функции используется образ в виде:

$$\omega(p) = f(p) = \frac{b(p)}{a(p)}, \quad (2)$$

где, $a(p)$ и $b(p)$ – полиномиальные функции, соответственно, знаменатель и числитель передаточной матрицы системы.

Для общего случая, когда задана дробно-полиномиальная матрица, то образ имеет вид:

$$\omega(p) = F(p) = \frac{b(p)}{a(p)} = \frac{1}{a(p)} [b_{ij}(p)]. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что образ при синтезе характеризует совокупность желаемых динамических и статических свойств, а при анализе – требуемое свойство проектируемой системы.

Изложенная технология вложения систем применяется для исследования статической устойчивости электрических систем.

Библиографический список

1. **Буков В.Н.** Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
2. **Мисриханов М.Ш.** Классические и новые методы анализа многомерных динамических динамически систем. –М.: Энергоатомиздат, 2004. – 566 с.
3. **Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М.** Матричные методы анализа малых колебаний электрических систем. –Т.: Фан ва технология, 2016. – 432 с.

*В.А. Исачкин, маг.;
рук. И.Е. Митрофанов, к.т.н.
(филиал ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» в г. Смоленске)*

МНОГОФАКТОРНЫЙ ПРОГНОЗ УЗЛОВОЙ НАГРУЗКИ ЭЭС

Прогнозирование используется практически во всём спектре задач электроэнергетики, включая планирование, и оперативное управления

режимов электроэнергетической системы. Повышение точности прогнозирования является актуальной проблемой, поскольку большинство существующих сегодня методов прогноза, таких как регрессионные, авторегрессионные, экспоненциального сглаживания (ЭС) и других [2], при прогнозе не учитывают дополнительные факторы, а шумы оказывают негативное влияние на точность результата [3].

Проблема в определенной степени решается методами многофакторного прогноза. Один из таких подходов, в основу которого положен сингулярный спектральный анализ (SSA) [1] предлагается в настоящей работе.

Используя алгоритм SSA выполним преобразование одномерного ряда электрической нагрузки в многомерный. После чего выделим из полученного многомерного ряда компоненты – тренд, периодическую составляющую и шум.

Для классического рекуррентного SSA прогноза выберем собственные тройки, которые явно соответствуют тренду, и периодической составляющей, при этом шумовые компоненты не будем включать в синтезируемый ряд.

Для случая многофакторного прогноза дополнительно учтем те шумовые компоненты SSA разложения, которые статистически наиболее тесно связаны со значениями температуры и освещенности.

После определения нужных собственных троек используя рекуррентный SSA-прогноз получим значение прогноза для обоих методов.

Для проведения численных экспериментов был использован ряд электрической нагрузки узла ЭЭС (бытовая и промышленная нагрузки) за период с 1.10.13 г. по 30.09.14 г. в 13 часов. Также были зафиксированы значения температуры наружного воздуха и освещенности за тот же период.

Использование в качестве базы для прогноза, усеченного (на 30 отсчетов) ряда предыстории позволило оценить отклонение прогнозируемых величин от фактических значений, полученных для методов ЭС, рекуррентного SSA и рекуррентного SSA с учетом шумовых составляющих.

Параметр сглаживания α , для прогноза методом экспоненциального сглаживания выбран согласно [4].

На рис. 1 показан прогноз на 30 дней полученный данными методами и фактическое значение потребляемой мощности.

Средняя абсолютная ошибка прогноза, полученная методом экспоненциального сглаживания равна 7.2 %, рекуррентного SSA-прогноза 6.0 %, многофакторного 5.4 %.

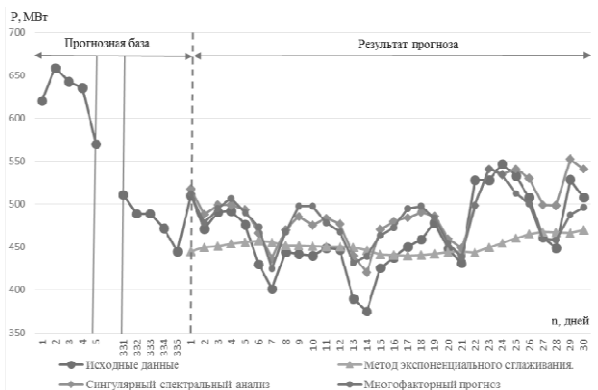


Рис. 1. Фактическое и прогнозируемые значения нагрузки

Исследования показали, что учет коррелированной шумовой составляющей (по методу рекуррентного SSA) оказывает положительное влияние на точность прогноза. Привлечение дополнительных факторов и усовершенствование способа выявления значимых собственных троек, в свете полученных результатов, должны привести к дальнейшему повышению точности.

Библиографический список

1. Данилов Д.Л. Главные Компоненты Временных Рядов: Метод «Гусеница». – С.-Петербургский государственный университет, 1997. – 316 с.
2. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
3. Седов А.В. Системы контроля, распознавание и прогнозирования энергопотребления: модели, методы, алгоритмы и средства. – Ростов-н/Д: Изд-во Ростовского Университета, 2002. – 320 с.
4. Поздеева О.Г. Прогнозирование национальной экономики. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2012. – 135 с.


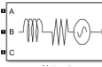

К.В. Терещенко, студ.;
рук. А.Г. Капустин, к.т.н., доц.
(БГАА, г. Минск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ MATLAB R2016b

MATLAB R2016b существенно отличается от предыдущих версий возможностями рабочего пространства, работой с графиками данных и интеграцией с Microsoft Excel [1].

Для моделирования характеристик синхронного двигателя в среде MATLAB R2016b использованы следующие блоки, функции которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Блоки, используемые при моделировании

 <p>Synchronous Machine 762 V / 111.9 kW</p> <p>Синхронная машина в двигательном режиме. Блок синхронной машины работает в режиме генератора или двигателя. Режим работы зависит от знака механической энергии: положительный для режима генератора, отрицательный для режима двигателя.</p>	 <p>Three-Phase Source Источник трехфазного тока. Задаем частоту 60 Гц.</p> <p>Parameters: Load Flow Configuration: Yn (grounded) Source: <input type="checkbox"/> Specify internal voltages for each phase Phase-to-phase voltage (Vrms): (762.1)*1 Phase angle of phase A (degrees): 0 Frequency (Hz): 60 Impedance: <input checked="" type="checkbox"/> Internal <input type="checkbox"/> Specify short-circuit level parameters Source resistance (Ohms): 762*2/10e6/10 Source inductance (H): 762*2/10e6/(2*pi*60) Base voltage (Vrms ph-ph): 25e3</p>
 <p>Three-Phase Series RLC Load Трехфазная нагрузка. Задаем мощность 10 кВт и частоту 60 Гц.</p> <p>Parameters: Load Flow Configuration: Y (grounded) Nominal phase-to-phase voltage Vn (Vrms): 762 Nominal frequency fn (Hz): 60 <input type="checkbox"/> Specify PQ powers for each phase Active power P (W): 10000 Inductive reactive power QL (positive var): 0 Capacitive reactive power Qc (negative var): 0 Measurements: None</p>	<p>17.888</p> <p>Блок Constant Напряжение обмотки возбуждения, нагрузка рассчитывается исходя из параметров машины. Для данной машины берем значение 17.888.</p> <p>Main Signal Attributes Constant value: 17.888 <input checked="" type="checkbox"/> Interpret vector parameters as 1-D Sample time: inf</p>

Модель синхронной машины в двигательном режиме представлена на рис. 1.

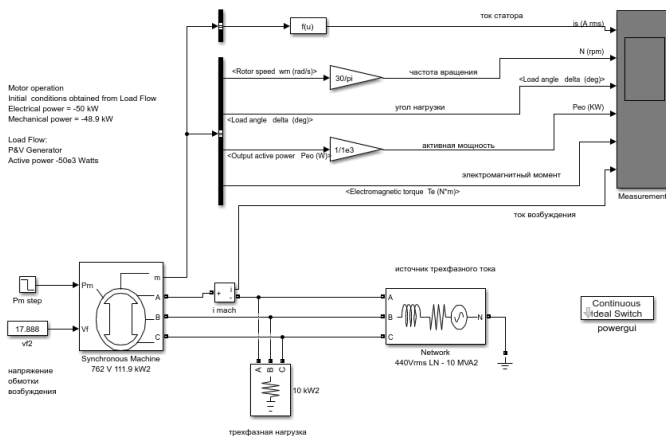


Рис. 1. Модель синхронного двигателя в среде MATLAB

Изменение нагрузки задается с помощью блока Three-Phase Series RLC Load. Изменяя нагрузку можно получить графики электромагнитных процессов (характеристик) двигателя в пусковом, рабочем и тормозных режимах [2].

Кроме того данная модель позволяет довольно просто реализовать векторное управление двигателем. Для этого необходимо в схему (рис. 1) добавить систему Field Orientation Control и инвертор Universal Bridge. Они осуществляют взаимное изменение векторов тока и напряжения для работы двигателя с максимальным КПД во всех эксплуатационных режимах.

Библиографический список

1. **The MathWorks.** – www.mathworks.com. Дата доступа: 14.12.2016.
2. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – Санкт-Петербург: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

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

КОМПОЗИТ – КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИТАЮЩИХ СЕТЕЙ

Передача электрической энергии сложный и многоэтапный процесс. Значительное место в указанном процессе занимают питающие сети, предназначенные для передачи электрической энергии от узловых подстанций единой национальной электрической сети к центрам питания распределительных сетей – районным подстанциям. Данные сети образуют региональные энергосистемы и зачастую представлены линиями 35 – 220 кВ.

Однако, несмотря на большую роль данных сетей, сегодня повсеместно наблюдается снижение безотказности и восстанавливаемости питающих сетей [1], табл. 1.

Таблица 1. Частота отказов воздушных линий 110 кВ, отказов/пролет*год

Компания	1984	2014	Изменение
Филиал ОАО «МРСК Сибири» «Бурятэнерго»	0,003705	0,010410	280 %
Филиал ОАО «МРСК Сибири» «Омскэнерго»		0,011830	320 %
Филиал ОАО «МРСК Северного Кавказа» «Чеченэнерго»		0,026538	720 %
Кабардино-Балкарский филиал ОАО «МРСК СК»		0,034061	920 %
Карачаево-Черкесский филиал ОАО «МРСК СК»		0,037579	1010 %

Согласно программе инновационного развития и единой технической политики ПАО «Россети», одним из перспективных способов повышения

надежности питающих сетей является применение инновационных конструктивных элементов линий, выполненных из композитных материалов: траверс, опор, проводов.

Преимущества композитных конструктивных элементов и эффективность внедрения в сетях 35 – 220 кВ с позиций надежности были рассмотрены в предыдущих исследованиях – [2, 3 и др.]. Наилучшим образом свойства рассматриваемых элементов проявляются в труднодоступных местах и сложных климатических территориях, зонах с агрессивной окружающей средой. Ряд электросетевых компаний в России уже имеют некий опыт эксплуатации композитных конструктивных элементов. К примеру, «МОЭСК», «Якутскэнерго» (композитные опоры 110 кВ), «Тюменьэнерго» (полностью выполненная из композита воздушная линия 110 кВ).

Важно отметить, что большим преимуществом использования композитных конструктивных элементов является вариативность их внедрения при реконструкции.

Во-первых, возможно использование композитных конструктивных элементов в различных сочетаниях:

- изолирующая композитная траверса (ИКТ);
- ИКТ и композитная опора;
- ИКТ, композитная опора, композитный провод,
- другие.

Во-вторых, возможна реконструкция лишь определенного участка (участков) линии, что позволяет достичь необходимого эффекта с позиций надежности, к примеру, при различных ограничениях на объем проводимых мероприятий.

В связи с указанным выше, при таком частичном внедрении композитных конструктивных элементов, образуется некая «новая» синтетическая линия, состоящая из традиционных и инновационных участков. Особенностью этой линии, помимо повышенных уровней безотказности и восстанавливаемости, является наличие «новых» электрических характеристик, влияющих на эффективность передачи электрической энергии, как по анализируемой «синтетической» линии, так и питающей сети в целом. И становится актуальной задача определения оптимальной длины инновационного участка и его местоположения с позиции повышения надежности питающей сети при не снижении ее экономической эффективности.

Библиографический список

1. **Бык Ф.Л.**, Казакова Л.С., Трофимов А.С. Конкурентные механизмы повышения надежности распределительной сети // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. статей по материалам междунар. семинара им. Ю.Н. Руденко. – Вып. 66. Актуальные проблемы надежности систем энергетики. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 87 – 93.

2. **Бык Ф.Л.**, Казакова Л.С., Китушин В.Г. Повышение надежности электросетей как эффект инноваций // Главный энергетик. – 2015. – № 1. – С. 30 – 34.

3. **Вук Ф.**, Kazakova L. Efficient ways and means of reliability increase of distribution networks // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792 : Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 280 – 285.

К.С. Никифоров, маг.;
рук. Т.Н. Яковкина, к.т.н., доц.
(ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск)

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ 220 кВ «НИЖНИЙ КУРАНАХ – ТОММОТ – МАЙЯ»

Проектируемая воздушная линия (ВЛ) 220 кВ «Нижний Куранах – Томмот – Майя» предназначена для повышения надежности электропитания потребителей Алданского и Томмотского районов в южной Якутии. Протяженность трассы ВЛ 220 кВ «Томмот – Майя» согласно проекту составит 434,7 км. Максимальный переток мощности в послеаварийном режиме запланирован порядка 114 МВт.

Ключевой проектной организацией ОАО «Дальэнергосетьпроект» был разработан проект строительства ВЛ 220 кВ «Нижний Куранах – Томмот – Майя» с применением традиционных проводов марки АС и опор типа П220-2. В качестве альтернативного варианта авторами статьи предложен вариант строительства этой линии с применением новых технологий, в частности – высокотемпературных проводов и стальных многогранных опор.

В рамках этого вопроса был произведен анализ эффективности различных вариантов высокотемпературных проводов по условиям: напряжения, расчётной токовой нагрузки, района по гололёду, материала и ценности опор. Результаты расчетов показали, что наиболее перспективным является провод марки АСПТ АТ1/20СА 240/56 [1].

Далее были произведены электрические, механические и технико-экономические расчеты ВЛ 220 кВ «Нижний Куранах – Томмот – Майя» для двух вариантов:

- с подвеской высокотемпературного провода АСПТ АТ1/20СА 240/56 на металлических многогранных опорах;
- с подвеской сталеалюминиевого провода марки АС 300/39 на стальных решетчатых опорах.

В целом, результаты проведенных расчетов показали, что применение высокотемпературных проводов позволит ВЛ работать в штатном режиме при температуре проводов 180 °С. Эти провода не подвержены отло-

жению гололеда, что весьма актуально для северных районов и означает как резкое снижение вероятности возникновения пляски, так и уменьшение пиковых нагрузок на опоры. Провод АСПТ АТ1/20SA по конструкции не отличается от классических проводов, это позволяет использовать все известные типы кабельной арматуры. Методики работы и монтажа этого провода идентичны методикам для классического провода АС [2].

Таким образом, применение высокотемпературных проводов позволит решить основные проблемы электросетей: повысить надежность и бесперебойность энергоснабжения, сократить потери и увеличить пропускную способность ВЛ (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика проводов АС 300/39 и АСПТ АТ1/20SA 240/56

Провод	АС 300/39	АСПТ АТ1/20SA 240/56
Вес, кг/км	1132	1037,7
Разрывное усилие, кН	90,574	106,603
Длительно допустимый ток, А	705	1096,5
Температурный коэффициент линейного расширения, град ⁻¹	19,8 · 10 ⁻⁶	18,3 · 10 ⁻⁶
Предел прочности при растяжении, даН/мм ²	27	33
Допускаемое напряжение, даН/мм ² :		
а) при max нагрузке и min температуре	12,2	14,9
б) при среднегодовой температуре	8,1	9,9

Согласно проведенным расчетам применение высокотемпературных проводов приведет к снижению потерь мощности в проектируемой ВЛ до 30 % и увеличит ее пропускную способность в 1,5 – 2 раза, что в свою очередь позволит достичь экономии за счет более низких потерь порядка 98 тыс. руб. на 1 км линии в год и за счет дополнительно передаваемой мощности – 150 – 250 млн. руб. на линию в год [3].

Многогранные опоры позволят сэкономить на транспортировке и строительно-монтажных работах, а также снизят затраты на эксплуатацию, ликвидацию и утилизацию. Экономический эффект при строительстве ЛЭП на многогранных опорах составит 40 – 45 % по сравнению с решетчатыми [4].

Библиографический список

1. **Провод** неизолированный из термостойкого алюминиевого сплава с сердечником из стальной проволоки, плакированной алюминием (Провод АСПТ). Режим доступа: <http://n-er.ru/provod-aspt>.
2. **Горюнов В.Н.** Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах / В.Н. Горюнов, А.А. Бубенчиков // Омский научный вестник. – 2009. – № 1 (77). – С. 106 – 108.
3. **Энергоэффективность** в электрических сетях. Провода ЛЭП пора менять. Режим доступа: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/621>.
4. **Стальные** многогранные опоры ЛЭП. Режим доступа: <http://elektropostavka.ru/stal-mnogogran-opor/>.

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

РАЗРАБОТКА ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО МУПК

Современное состояние энергосистемы в мире, из-за ряда проблем транспортировки электроэнергии, диктует необходимость разработки мобильных, малогабаритных и высокоэффективных устройств продольной компенсации. Данную задачу решают малогабаритные устройства распределенной продольной компенсации (МУПК), групповое использование которых позволяет управлять потоками мощности в энергосистеме. Концепция МУПК является инновационной, следствием этого стало проведение в ОАО «ЭНИН» НИОКР «Исследование и разработка опытного образца малогабаритного устройства продольной компенсации для ЛЭП 220 кВ с выбором и обоснованием пилотного объекта внедрения» по заказу ПАО ФСК ЭЭС.

В настоящее время промышленное исполнение имеет индуктивный МУПК, инжектирующий в линию сопротивление только индуктивного характера, величина которого определяется величиной индуктивности намагничивания трансформатора. Поэтому в рамках НИОКР была поставлена задача разработать МУПК, который способен как догрузить, так и разгрузить линию в месте установки. В ОАО «ЭНИН» был разработан опытно-промышленный образец индуктивно-емкостного МУПК, имеющий возможность вносить в линию сопротивление как индуктивного, так и емкостного характера.

В состав основного оборудования опытно-промышленного образца индуктивно-емкостного МУПК, схема которого представлена на рис. 1 входят:

- силовой трансформатор, Тр. (тороидальный магнитопровод ОЛ 50x80x1200, собственная индуктивность намагничивания 25 мкГн, общий вес – 30 кг);
- силовые полупроводниковые ключи, VS, VS1, VS2 (MT1-100-12);
- нормально замкнутое реле, S (Finder 66.82.9.012.0000);
- конденсаторы, C1 = 80 мкФ, C2 = 160 мкФ (ДПС-0.6-80);
- источник питания собственных нужд, ИПСН ($U_{out} = 12$ В, $P_{out} = 24$ Вт);
- блок управления, БУ (МУПК работает под управлением микроконтроллера фирмы Миландр – K1986BE92QI);
- датчик тока линии, ДТ;

- модуль связи, МС. Обеспечивает связь МУПК с оператором (Xbee Pro).
Общий вес опытно-промышленного образца МУПК равен 48.3 кг.

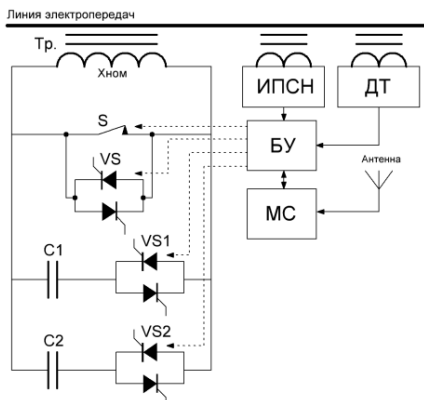


Рис. 1. Схема опытно-промышленного образца индуктивно-емкостного МУПК

Номинальная величина тока, на которую рассчитана работа МУПК, составляет 750 А. Как было показано в работе [1], индуктивно-емкостной МУПК может находиться в 4 режимах. Необходимая мощность для функционирования МУПК выдаваемая ИПСН достигается при токе в линии 100 А.

Таблица 1. Основные характеристики режимов МУПК

№ режима	Диапазон токов, А	$K_{шжс}$	$Z_{шжс}$, мОм	$C_{экв}$, мкФ
1	$0 - I_{к2}$	0	0	-
2	100 – 975	1	7.85	-
3	100 – 375	2	15.7	80
4	100 – 375	-2	-15.7	240

Было изготовлено 3 опытно-промышленных образца данного МУПК. На полигоне АО ФСК НТС была проведена их опытно-промышленная эксплуатация. Величина ток ВЛ составляла 150 А. Была установлена радиосвязь между оператором и опытными образцами МУПК. В ходе эксплуатации была подтверждена корректность работы всех режимов работы МУПК.

Библиографический список

1. Петров М.И. Исследование режимов работы индуктивно-емкостного МУПК / М.И. Петров, П.А. Рашитов // Электроэнергетика: одиннадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический институт имени В.И. Ленина», 2016. – С. 33 – 34.

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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО МУПК

В настоящее время в электроэнергетику начинают активно внедряться малогабаритные устройства распределенной продольной компенсации (МУПК). Задача данного типа устройств – осуществлять перераспределение потоков мощности. Для этого, МУПК оснащается измерительными и коммуникационными системами, которые позволяют оперативно воздействовать на режим работы устройства, а также получать актуальную информацию по основным режимным параметрам ЛЭП.

Передача измеренных параметров линии, текущего режима работы и параметров МУПК оператору, осуществляется посредством беспроводной сети, основанной на стандарте IEEE 802.15.4 (Zigbee). Беспроводной способ связи оператора с МУПК имеет ряд преимуществ над проводным, среди них: простота монтажа, отсутствие необходимости прокладки кабелей связи, легкость в добавлении и удалении узлов.

В работе [1] представлены возможные режимы работы индуктивно-емкостного МУПК. Было необходимо разработать систему управления, включающую в себя плату управления (ПУ) и систему дистанционного управления (СДУ). ПУ, интегрированная в корпус МУПК, генерирует импульсы управления необходимые для заданного режима, следит за текущими параметрами МУПК и ЛЭП. СДУ устанавливаемая на персональный компьютер оператора и предназначена для связи оператора с МУПК и отображения информации с текущими параметрами МУПК и ЛЭП.

Для переключения режимов работы МУПК, оцифровки аналоговых сигналов, передачи оператору текущей информации используется 32-х разрядный микроконтроллер фирмы Миландр – K1986VE92Q1 с ядром Cortex M3, установленный на плату управления.

На ПУ заведены следующие аналоговые сигналы: ток ВЛ (ДТ1), напряжение (ДН) и ток (ДТ2) вторичной стороны МУПК, ток конденсаторной ветви С1 (ДТ3) и С2 (ДТ4), напряжение источника питания собственных нужд (ИП), а также напряжение с датчиков температуры ключей VS1, VS2, вторичной стороны трансформатора МУПК и окружающей среды (рис. 1). Для корректной оцифровки и защиты портов микроконтроллера от перенапряжения данные аналоговые сигналы должны быть в диапазоне 0 В – максимальное напряжение питания микроконтроллера (3.6 В).

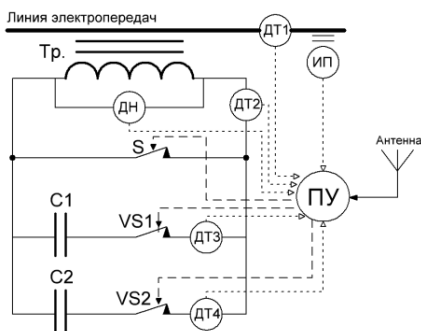


Рис. 1. Расположение датчиков в индуктивно-емкостном МУПК

Для организации связи оператора с МУПК на ПУ установлен модуль связи Xbee Pro, работающий в системе беспроводной сети ZigBee. Сопряжение микроконтроллера с Xbee Pro осуществляется через интерфейс UART. В среде Keil на языке программирования C был разработан программный код, учитывающий архитектуру микроконтроллера K1986VE92QI.

Система дистанционного управления была разработана на актуальном в текущее время объектно-ориентированном языке C#, визуальное оформление в котором осуществляется через формы, которые знакомы пользователям операционной системы Windows. СДУ осуществляет связь оператора с МУПК путем передачи пакетов данных формата ZigBee между предустановленным на персональный компьютер оператора модемом беспроводной сети ZigBee и модулем связи Xbee Pro, который установлен на плате СУ.

СДУ обладает следующими функциями: переключение режимов работы МУПК как одного, так и группы устройств; передача уставок в МУПК, используемые для организации внутреннего события; отображение текущих параметров МУПК и ЛЭП; отображение осциллограмм тока ВЛ и напряжения на вторичной стороне.

Корректность работы системы управления индуктивно-емкостных МУПК успешно проверена на опытных образцах индуктивно-емкостных МУПК.

Библиографический список

1. **Петров М.И.** Исследование режимов работы индуктивно-емкостного МУПК / М.И. Петров, П.А. Рашитов // Электроэнергетика: одиннадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический институт имени В.И. Ленина», 2016. – С. 33 – 34.

*Дж.Б. Рахимов, К. Насыр у., аспиранты,
рук. Ю.П. Гусев, к.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

О КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ В РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Рост требований к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии приводит к необходимости развития и модернизации распределительных сетей. Эффективное решение этой задачи требует расширенного использования математических и компьютерных моделей электрических сетей (ЭС).

Одним из современных расчетных инструментов сетевого планирования, моделирования и анализа является программный комплекс (ПК) NEPLAN. ПК NEPLAN используют более чем в 600 электросетевых компаниях в 80 странах мира. ПК NEPLAN около 10 лет активно используется на кафедре «Электрические станции» НИУ «МЭИ» в учебном процессе и при выполнении научно-исследовательских работ. В частности, авторами данной статьи ПК NEPLAN использован для анализа вопросов координации токов короткого замыкания в ЭС Кыргызстана и Таджикистана [1]. Выявлены электростанции и подстанции с критическим соотношением уровней токов короткого замыкания и параметров характеризующих отключающую способность выключателей и электродинамическую стойкость трансформаторов.

ПК NEPLAN представляет собой набор из 42 модулей и позволил комплексно решать широкий круг задач, связанных с развитием и эксплуатацией электрических сетей [2]: расчет токов короткого замыкания (КЗ); расчет параметров качества и потерь электроэнергии; расчет надежности и оптимизация сетей; расчет устойчивости электроэнергетических систем.

При использовании ПК NEPLAN использовалась возможность варьирования методов расчета потокораспределений в электрических сетях: расширенный метод Ньютона–Рафсона, итерации по току, падение напряжения и установившийся режим по постоянному току. Сопоставлялись результаты расчетов токов КЗ, выполненных разными методами, рекомендуемыми стандартами IEC 60909 [3], ANSI 37.10/37.13 [4] и методом наложения.

Параметризация моделей осуществлялась как путем ввода через диалоговое окно, так и из базы данных, с помощью модуля «SQL Database Drive». Ускорению отладки расчетной модели способствует наличие возможности контроля числовых исходных данных, при выходе параметров за пределы диапазона допустимых значений, появляется предупреждающее сообщение.

ПК NEPLAN позволил выполнить расчеты электрических сетей разной конфигурации:

- сложносамкнутых и радиальных, с разными способами заземления нейтрали;

- комбинированных сетей переменного и постоянного тока с полупроводниковыми преобразователями: инверторами и выпрямителями.

В процессе выполнения работы, авторы, используя средства ПК NEPLAN, обладающего средствами поддержки анализа схем большой размерности, создали расчетные модели электроэнергетических систем Кыргызстана и Таджикистана. Протестировали возможность коллективной удаленной работы с моделью через интернет. Использовали возможности экспорта/импорта данных в формате, совместимом с МЭК 61970 (CIM), возможности автоматизации расчетов и процессов вывода протоколов с результатами при решении специфических задач с модулем «NEPLAN Programming Library» (NPL).

Полученный опыт создания и использования расчетных моделей распределительных сетей ЭС Кыргызстана и Таджикистана позволяет решать широкий набор задач и открывает новые горизонты возможностей повышения эффективности работы ЭС и планирование их развития. Одной из задач, планирования развития ЭС Кыргызстана и Таджикистана является задача координации токов короткого замыкания.

Библиографический список

1. **Рахимов Дж.Б.,** Гусев Ю.П. Рост уровней токов короткого замыкания – сдерживающий фактор развития экономики // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: мат. IV-й российской молодежной научной школы-конференции. В 2 т. Т. 2 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «ЦРУ», 2016. – С. 80 – 84.
2. **Опыт** использования расчетных моделей в распределительных сетях / Гусев Ю.П., Гусев О.Ю., Трофимов В.А. // Энергетик. – 2015. – № 1. – С. 25 – 27.
3. **IEC 60909-0.** Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Calculation of currents. 2001. – 148 p.
4. **IEEE** Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis. ANSI/IEEE C37.010-1999. – 81 p.

*С.М. Тукаев, Н.А. Белоусова, студенты;
рук. Р.Г. Хузяшев, к.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)*

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ К ПОВРЕЖДЕННОМУ УЧАСТКУ СЕТИ ПУТЁМ АНАЛИЗА ВХОДЯЩИХ И ВЫХОДЯЩИХ СИГНАЛОВ В ОТДЕЛЬНОМ ОБЪЕКТЕ СЕТИ 6 – 10 кВ (РП/ТП)

Рассмотрен волновой метод обнаружения направления к поврежденному участку. Метод основан на анализе сигнала переходного процесса, возникающий в месте повреждения линии в момент межфазного корот-

кого замыкания (КЗ) или однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Такой сигнал называют «сигналом переходного процесса», его особенностями являются наличие крутого переднего фронта сигнала, длительностью от единиц до десятков микросекунд и распространение его в обе стороны вдоль линии от точки аварии. Носителем сигнала переходного процесса являются как сигналы тока, так и сигналы напряжения. Предлагается производить анализ сигнала переходного процесса для определения направления к поврежденному участку с помощью устройства, для реализации которого предлагается применение готовой платы Arduino Leonardo, магнитной антенны, емкостного делителя с емкостью примерно 50 пФ, модуля GSM/GPRS SIM900 для передачи данных и модуля GPS для определения местоположения повреждения.

Для регистрации направления распространения мгновенной мощности сигнала ПП достаточно замерять осциллограммы тока и напряжения нулевой последовательности на одном из выходов транзитной РП. Полярность переднего фронта ПП сигналов напряжения на входе и выходе совпадает, что обусловлено их одинаковым потенциалом. Полярность переднего фронта ПП сигналов тока на входе и выходе РП противоположные, т.к. с одной стороны РП ток входит, а с другой стороны РП ток выходит. Совпадение полярностей переднего фронта ПП сигналов напряжения и тока говорит об одном направлении к поврежденному участку, а противоположная полярность – указывает на противоположное направление к поврежденному участку. Полярность сигналов зависит от взаимной ориентации датчиков сигналов тока и напряжения.

На рис. 1. приведен пример осциллограмм тока и напряжения переходного процесса в сети 6 – 10 кВ, зарегистрированных в единой шкале времени в начале фидера [Исследование и разработка средств защиты и локации замыканий на землю фидера распределительной сети Белянин Андрей Александрович, <http://www.dslib.net/elektro-stancii/issledovanie-i-razrabotka-sredstv-zawity-i-lokacii-zamykanij-na-zemlju-fidera.html#7312934>].

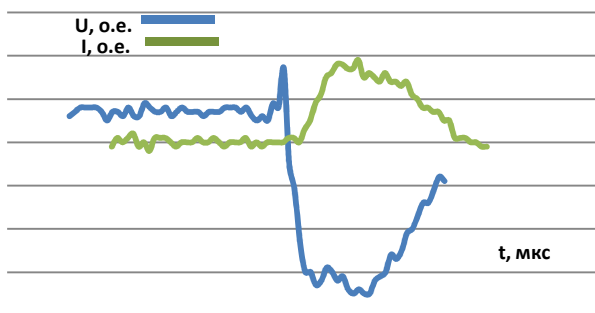


Рис. 1. Осциллограмма тока и напряжения переходного процесса в сети 6 – 10 кВ

Терминал регистрирует наличие сигнала переходного процесса как в канале тока, так и в канале напряжения. Одинаковость времени возникновения сигнала ПП в обоих каналах подтверждает их взаимную связь.

Библиографический список

1. **Белянин А.А.** Исследование и разработка средств защиты и локации замыканий на землю фидера распределительной сети. – Чебоксары, 2015.
2. **Смирнов А.Н.** Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110 – 220 кВ. – М., 2015.

С.Д. Никитина, студ.;
рук. В.П. Голов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЭС С УПРАВЛЯЕМОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рост потребления электроэнергии и развитие электроэнергетических систем требуют совершенствования управления режимами ЭЭС, в том числе перетоками электроэнергии по ЛЭП. Одним из современных эффективных средств управления режимами становятся управляемые линии электропередачи. Для увеличения пропускной способности линий сверхвысокого напряжения все чаще применяются устройства продольной компенсации (УПК) [1].

Установка сосредоточенного УПК помимо всех своих преимуществ имеет недостаток в виде перепада напряжения на его выводах при передаче значительной мощности. С целью поддержания уровней напряжения на выводах УПК устанавливаются шунтирующие реакторы (ШР), как управляемые (УШР), так и неуправляемые. Включение подобных устройств в работу перераспределяет потоки реактивной мощности по сети, что сказывается на режимах и устойчивости системы в целом [2].

Целью данной работы является исследование эффективности применения шунтирующих реакторов, как в дискретном, так и в управляемом исполнении на статическую устойчивость (СУ) исследуемой ЭЭС при применении управляемого устройства продольной компенсации (УУПК).

Исследуемая электрическая система – изолированная, состоит из двух эквивалентных генераторов, работающих через управляемую линию электропередачи на общую нагрузку. Линия электропередачи имеет УУПК в середине линии, на выводах которого установлены ШР в дискретном или управляемом исполнении.

Регулирование УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока в линии [2]:

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 I)}.$$

Плавное регулирование УШР осуществляется путем изменения индуктивного сопротивления в зависимости от напряжения в точке подключения реактора [3]:

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

По разработанной математической модели для данной электрической системы произведен расчет установившихся режимов и получены зависимости свободного члена характеристического уравнения для оценки аperiodической статической устойчивости, а также области устойчивости – для оценки колебательной СУ.

Для управляемого УПК увеличение числа включенных реакторов ведет к увеличению предела по аperiodической статической устойчивости. Однако комплексное управление УУПК и УШР дает наибольшее увеличение запаса системы по аperiodической СУ [3].

Колебательная статическая устойчивость для дискретного исполнения ШР оценивалась по полученным в ходе эксперимента областям, представленным на рис. 1.

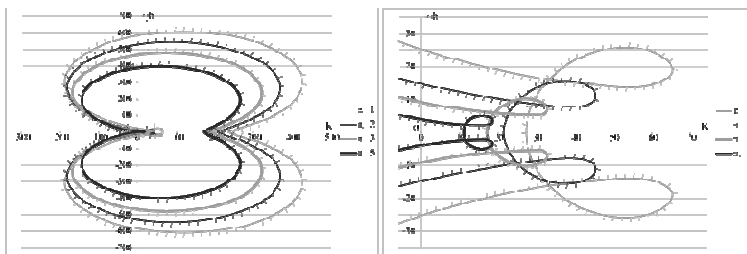


Рис. 1. Области устойчивости регулируемого УПК при включении по 1, 2, 3 и 5 групп ШР

Включение в работу дополнительных групп ШР отрицательно сказывается на диапазоне допустимого изменения коэффициента регулирования УУПК и уменьшает области устойчивости в целом. Однако, применительно к исследуемой системе, все используемые коэффициенты с запасом обеспечивают системе колебательную статическую устойчивость [3].

Библиографический список

1. **О применении** устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России / А.В. Антонов, В.К. Фокин, Е.В. Тузлукова // Энергия единой сети. – 2016. – № 6 (29). – С. 26 – 41.

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

3. **Регулирование** мощности шунтирующих реакторов для улучшения устойчивости энергосистемы с управляемым устройством продольной компенсации / Н.Е. Введенский, В.П. Голов, А.С. Казарин [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 49 – 56.

Ю.О. Чуркина, студ.;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Применение продольной ёмкостной компенсации в дальних электропередачах позволяет увеличить пропускную способность линий, а, следовательно, повысить надёжность ЭЭС в целом. Однако, при значительной степени компенсации индуктивного сопротивления передачи могут возникнуть проблемы, связанные с колебательным нарушением статической устойчивости ЭЭС [1]. Поэтому необходимо осуществить корректный выбор настроечных параметров УУПК с точки зрения сохранения статической устойчивости в возможных рабочих режимах. Кроме того, нужно учитывать взаимное влияние регулируемых устройств: неверный выбор настроечных параметров АРВ также может привести к нарушению устойчивой работы системы.

Таким образом, во избежание негативных последствий необходимо определить область устойчивости ЭЭС в координатах коэффициентов регулирования управляемых устройств для возможных режимов ЭЭС.

Исследуемая система представляет собой две электрические станции, которые работают на общую нагрузку и связаны между собой линией электропередачи с управляемым устройством продольной ёмкостной компенсации. Генераторы станций снабжены АРВ.

Для исследования влияния значений коэффициентов регулирования АРВ и УУПК на статическую устойчивость ЭЭС была составлена математическая модель с учётом электромагнитных и электромеханических переходных процессов в элементах ЭЭС. По данной модели построены области устойчивости с помощью метода D-разбиения для возможных рабочих режимов.

В качестве проверки полученных результатов выполнены расчеты переходных процессов в ЭЭС для значений коэффициентов регулирования, находящихся в устойчивой и неустойчивой областях, и показаны характеры изменения значений режимных параметров в обоих случаях.

Библиографический список

1. **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.

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

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО
УТЯЖЕЛЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ
УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОМАШИННОЙ ЭЭС**

Для надёжной работы энергосистем необходимо обеспечивать запас статической аperiodической устойчивости по активной мощности в сечениях и по напряжению в узлах нагрузки, а также отсутствие самораскачивания, т.е. нарушений колебательной устойчивости, в области допустимых режимов [1].

В виду отсутствия у организаций, занимающиеся проектированием и эксплуатацией энергосистем, специализированных программно вычислительных комплексов для оценки статической устойчивости с учётом самораскачивания и поиска предела по активной мощности для сечений и по напряжению для узлов, ранее был предложен метод непрерывного динамического утяжеления [2], позволяющий анализировать статическую устойчивость с помощью программ для расчёта электромеханических переходных процессов (RUSTab, EVROSTAG и др.) [3].

В данной работе продемонстрировано применение метода непрерывного динамического утяжеления для анализа статической устойчивости на примере участка энергосистемы, входящего в операционную зону Воронежского РДУ и включающего в себя Нововоронежскую АЭС, Воронежскую ТЭЦ -1 и ТЭЦ-2 и прилегающие сети 500, 220 и 110 кВ. Расчёт электромеханических переходных процессов производится в программе RUSTab.

Результаты расчётов показали, что предложенный подход целесообразно применять для анализа статической устойчивости крупных энергосистем.

Библиографический список

1. **Методические** указания по устойчивости энергосистем. СО 153-34.20.576-2003. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

2. **Братолобов А.А.** Выявление предела статической устойчивости электроэнергетической системы методом непрерывного динамического утяжеления режима / А.А. Братолобов, Н.А. Огорельшев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (10-е Б-

нардосовские чтения: тез. докл. междунар науч.-техн. конф. – Т. 1. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2001. – С. 53.

3. **Брыдин А.А.** Исследование статической устойчивости методом численного интегрирования нелинейных уравнений ЭЭС / Энергия-2016: тез. докл. междунар науч.-техн. конф. – Т. 3. Электроэнергетика. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2016. – С. 42.

*А.А. Комухов, М.С. Кустикова, студенты;
рук. А.А. Мартирисян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАСТРОЕЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ АРВ ГЕНЕРАТОРОВ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС ПРИ НАЛИЧИИ УПРАВЛЯЕМОГО УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Зарубежная практика показала, что управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) позволяют значительно увеличивать пропускную способность линий электропередачи и при этом поддерживать режимные параметры в допустимых пределах во всем диапазоне возможных рабочих режимов. Применение подобных устройств целесообразно и в России. В [1] было доказано положительное влияние УУПК на апериодическую статическую и динамическую устойчивость генераторов Саяно-Шушенской ГЭС.

Применение управляемых устройств усложняет задачу обеспечения колебательной устойчивости, следовательно, этот вопрос становится еще более важным и требующим детального рассмотрения [2]. Сохранение колебательной устойчивости в энергосистеме обеспечивается за счет автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) генераторов, поэтому необходимо правильно определять диапазон значений настроечных параметров АРВ.

Для решения этой задачи был проведен анализ колебательной устойчивости с использованием полной математической модели участка электроэнергетической сети, схема которого изображена на рис. 1.

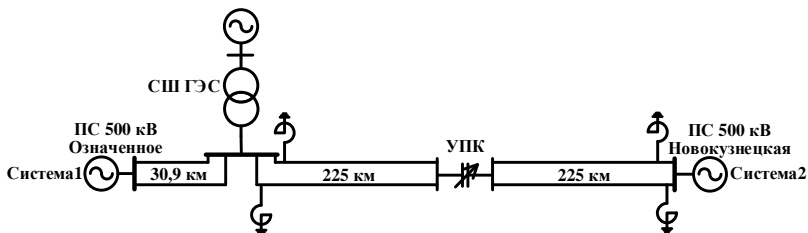


Рис. 1. Схема исследуемого участка сети

Для АРВ сильного действия генераторов Саяно-Шушенской ГЭС настроечными коэффициентами являются коэффициент по отклонению частоты и коэффициент по первой производной изменения частоты. На рис. 2 показаны границы областей D-разбиения по двум параметрам, соответствующие различным законам регулирования УПК. Область устойчивости показана затемненной частью плоскости. Кривой под цифрой 1 изображена граница области устойчивости для нерегулируемого УПК. Кривой 2 изображена граница устойчивости для закона регулирования УПК, при котором диапазон изменения степени компенсации индуктивного сопротивления линии составляет от 20 до 50 %, кривой 3 – от 30 до 50 %, кривой 4 – от 10 до 50 %.

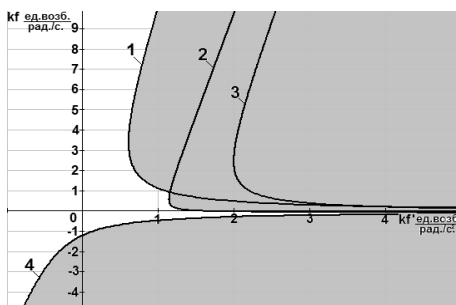


Рис. 2. Границы областей D-разбиения

Исследование показало, что при наличии регулирования емкостного сопротивления УПК область устойчивости сужается. При этом возможны такие законы регулирования, при которых отсутствует область устойчивых настроечных параметров АРВ (кривая 4). Для данной системы наиболее оптимальным с точки зрения колебательной устойчивости является закон регулирования, при котором диапазон изменения степени компенсации индуктивного сопротивления линии составляет от 20 до 50 %.

Полученные диапазоны значений настроечных параметров АРВ для различных законов регулирования УПК позволят достичь максимальной эффективности применения регулируемых УПК с точки зрения улучшения устойчивости электрической системы.

Библиографический список

1. **Применение** управляемого устройства продольной компенсации с целью повышения выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС / Комухов А.А., Кустикова М.С., Мартиросян А.А. // Электроэнергетика глазами молодежи: мат. VII Междунар. науч.-техн. конф. – С. 161 – 164.
2. **Голов, В.П.** Линия электропередачи сверхвысокого напряжения переменного тока: метод. указания для курсового проектирования / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин; ФГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 36 с.

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

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УПРАВЛЯЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Современное состояние энергетики характеризуется продолжающимся ростом нагрузок, объединением электрических сетей в национальные энергосистемы, а также авариями, возникающими из-за слабости отдельных межсистемных связей. Все чаще возникает перегруженность распределительных сетей, неэкономично распределяется нагрузка, межсистемные связи имеют недостаточную пропускную способность. Управляемые линии электропередачи являются одним из наиболее эффективных средств для решения этих задач [1].

К числу управляемых устройств, получивших применение в магистральных электропередачах сверхвысокого напряжения, относятся установки управляемой продольной емкостной компенсации (УУПК), которые могут быстро изменять свое сопротивление в соответствии с изменением режима системы. В зависимости от длины линии и величины степени компенсации емкостное сопротивление можно устанавливать в одном месте либо распределять по всей длине линии.

В работе рассматривается линия 500 кВ с двумя установками продольной емкостной компенсации. Цель работы заключалась в определении оптимального расстояния между двумя УПК, как с точки зрения наибольшей пропускной способности, так и напряжений на выводах конденсаторных батарей (КБ). В зависимости от места установки УПК и величины степени компенсации также можно решить вопрос об установке шунтирующих реакторов [2].

В ходе работы было получено эквивалентное сопротивление связи без учета сопротивления системы. Для линии 500 кВ и длиной свыше 500 км определено оптимальное расстояние между двумя УПК. Проведенный анализ показал, что изменяя расстояние между УПК, можно получить условия, при которых напряжения на выводах КБ будут ниже допустимых значений во всех нормальных режимах.

Библиографический список

1. Некукар А.Р. Выбор расположения установок распределенной продольной емкостной компенсации на линии электропередачи // Вестник МЭИ. – 2010. – № 4. – С. 5 – 11.
2. Голов В.П. Расчет характеристик установившихся режимов электроэнергетической системы с регулируемым устройством продольной компенсации / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 18 – 22.

*А.А. Зими́на, Ю.Д. Ры́жов, студенты;
рук. А.А. Мартиросян, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МАТЛАВ

Применение продольной емкостной компенсаций регулируемой в функции тока линии позволяет не только повышать пропускную способность дальней передачи, но и улучшать показатели апериодической статической и динамической устойчивости при изменениях величины передаваемой мощности в широком диапазоне. Управляемое УПК, степень компенсации которого возрастает с ростом передаваемой мощности, также положительно влияет на показатели режима системы по напряжению и реактивной мощности.

Однако при исследовании колебательной статической устойчивости при значительных перетоках мощности с применением регулируемого УПК емкостное сопротивление может принимать значение близкое к границе зоны самовозбуждения [2]. В результате возрастание тока линии приводит к нарушению условий сохранения колебательной устойчивости.

Анализ предельных режимов в программном комплексе MATLAB показал, что такое отрицательное влияние регулируемого УПК на колебательную статическую устойчивость наблюдается при высоких значениях степени компенсации. Такая степень компенсации не применяется в практике эксплуатации электрических систем. Как показали исследования, даже при таких высоких степенях компенсации при совместном выборе законов регулирования управляемых УПК и АРВ можно устранить отрицательное влияние регулируемых УПК на колебательную статическую устойчивость.

Исходя из этого, можно сделать заключение о том, что законы регулирования УПК, положительно влияющие на апериодическую статическую устойчивость и динамическую устойчивость в диапазоне рабочих режимов, не приводят к нарушениям колебательной статической устойчивости при различных законах регулирования.

Библиографический список

1. **Влияние** законов регулирования УПК на устойчивость электрической системы / В.П. Голов, А.А. Мартиросян // Вестник ИГЭУ. – 2003. – Вып. 5.
2. **Анализ** статической колебательной устойчивости электрической системы с регулируемым УПК / В.П. Голов, А.А. Мартиросян // Вестник ИГЭУ. – 2004.

*Н.А. Градов, Е.С. Скоропеева, студенты;
рук. Д.Н. Кормилицын, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Устройства продольной компенсации (УПК) широко применяются в энергосистемах мира для повышения пропускной способности линий электропередач. Использование управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) позволяет еще более повысить предел передаваемой мощности. Совместное использование УУПК, управляемых шунтирующих реакторов (УШР) и устройства автоматического регулирования возбуждения сильного действия (АРВ СД) повышает предел передаваемой мощности по статической и динамической мощности [1].

Целью данной работы является построение области устойчивости ЭЭС с управляемой ЛЭП с помощью линеаризованной модели с численным нахождением частных производных.

Исследование устойчивости ЭЭС производилось для системы с одной станцией, работающей через управляемую линию электропередачи на шины бесконечной мощности (рис. 1). Линия электропередачи имеет УУПК в середине линии. На каждом выводе УУПК установлены УШР.

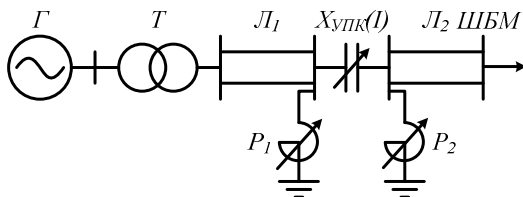


Рис. 1. Исследуемая электрическая схема

Автоматическое регулирование возбуждения сильного действия характеризуется быстроедействующей форсировкой возбуждения, что повышает предел статической устойчивости ЛЭП. Влияние сильного регулирования на синхронную динамическую устойчивость проявляется в успокоении колебаний после отключения КЗ и предотвращении нарушения устойчивости. Для получения необходимых областей устойчивости в плоскости коэффициентов регулирования АРВ СД была использована линеаризованная математическая модель рассматриваемой электроэнергетической системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_j \cdot p^2 \cdot \delta_{12} - D \cdot p \cdot \delta_{12} = P_T - P_3 \\ I_4 = f(\delta_{12}, X_{\text{унк}}, X_{p1}, X_{p2}) \\ X_{\text{унк}} = f(I_4, K_2) \\ U_4 = f(\delta_{12}, X_{p1}) \\ X_{p1} = f(U_4, K_{p1}) \\ U_5 = f(\delta_{12}, X_{p2}) \\ X_{p2} = f(U_5, K_{p2}) \end{array} \right.$$

По результатам расчета по данной математической модели получены значения частных производных, сформирован характеристический определитель и построены области устойчивости для исследуемой ЭЭС.

Библиографический список

1. **Регулирование** мощности шунтирующих реакторов для улучшения устойчивости энергосистемы с управляемым устройством продольной компенсации / Н.Е. Введенский, В.П. Голов, А.С. Казарин [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 49 – 56.

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В СЕТИ 500 кВ

В сетях 500 кВ основной причиной феррорезонанса являются коммутации холостых ошинок. Емкость конденсаторов, шунтирующих разрывы выключателей, совместно с емкостью ошиновки и подключенного к ней оборудования на землю образуют феррорезонансный контур [1].

На ПС 500 кВ обычно количество присоединений невелико, кроме того, ОРУ-500 часто проектируются по схемам 3/2 или 4/3. Схема ОРУ-500, выполненная по схеме 3/2, приведена на рис. 1, а. Расчетная схема для исследования процессов при отключении холостой ошиновки приведена на рис. 1, б [1].

Для определения возможности возникновения феррорезонанса рассчитываются параметры всех элементов схемы замещения рис. 1, б: суммарные емкости выключателей, системы шин и характеристика намагничивания трансформатора напряжения.

Свойства нелинейной индуктивности задаются кривой намагничивания, полученной по непосредственным сетевым измерениям [1], которая аппроксимируется выражением [2]:

$$\psi = A \cdot \arctg(B \cdot I) + C \cdot I, \quad (1)$$

где A, B, C – коэффициенты аппроксимации.

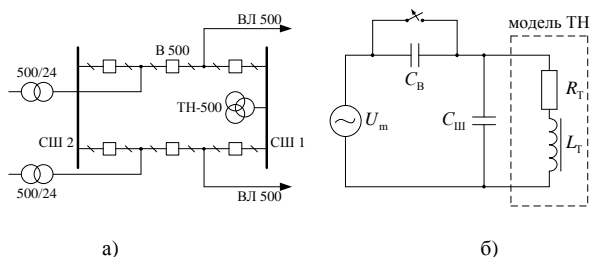


Рис. 1. Принципиальная схема подстанции 500 кВ (а) и расчетная схема для моделирования коммутации холостой ошиновки (б)

Приближенная модель для исследований воссоздана с помощью программного комплекса MatLab с использованием библиотек блоков Simulink и SimPowerSystems (рис. 2, а).

Возможность возникновения феррорезонанса в схеме на рис. 2, а (при отключении холостой ошиновки) зависит от двух основных факторов: напряжения источника и величины и соотношения емкостей делителей и ошиновки. Путем проведения многочисленных автоматизированных расчетов при варьировании этих емкостей (напряжение равно номинальному) можно получить область существования феррорезонанса (область опасных параметров). Эта область для ТН НКФ-500 приведена на рис. 2, б.

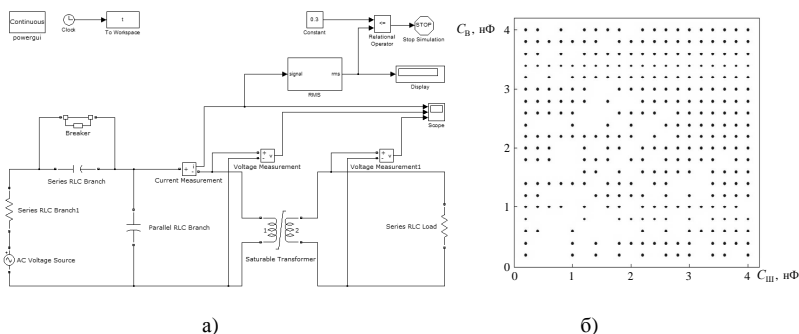


Рис. 2. Модель для расчета возможного феррорезонанса в MatLab (а) и область существования феррорезонанса при отключении холостой ошиновки с ТН (б)

Из полученных данных видно, что у НКФ феррорезонанс возникает практически при всех сочетаниях емкостей делителей и ошиновки, что

приводит к существенному повышению напряжения на ТН по отношению к номинальному напряжению и значительному превышению действующего значения тока в обмотке ТН допустимой величины.

Следовательно, должны производиться различные мероприятия для предотвращения феррорезонанса, такие как [3]:

- 1) исключение образования феррорезонансного контура;
- 2) расстройка феррорезонансного контура;
- 3) снижение добротности феррорезонансного контура за счет управляемого ввода в контур с последующим выводом резистора с активным сопротивлением.

Библиографический список

1. СТО 56947007-29.240.10.191-2014 Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6 – 750 кВ.
2. Макаров, А.В. Об эффективности функционирования антиферрорезонансных трансформаторов напряжения // Энергоэксперт. – 2013. – № 6.
3. 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.

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

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ТВЕРСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Тверская область является субъектом Российской Федерации, расположенным в европейской части страны. Тверская энергосистема входит в операционную зону Филиала АО «СО ЕЭС» Тверское РДУ. Крупнейшими объектами генерации в рассматриваемой энергосистеме являются Калининская АЭС и Конаковская ГРЭС. В районе города Тверь располагаются теплоэнергоцентраль: ТЭЦ-1, ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4, обеспечивающие электроэнергией и теплом потребителей областного центра. В том числе источником питания являются шины 110 кВ подстанции Калининская (рис. 1). Общая установленная мощность субъектов генерации всей энергосистемы равна 6795,6 МВт. Установленная мощность электрических станций, расположенных в черте города соответственно равна 11, 170 и 88 МВт, при этом максимум потребления г. Твери составляет 245 МВт [1].

К основным проблемам рассматриваемой энергосистемы можно отнести недостаточную пропускную способность электрических сетей 110 кВ «городского кольца». Также отсутствие резерва трансформаторных мощностей в сети 110 – 330 кВ, и как следствие, ограничения при проведении ремонтов на ПС 330 кВ Калининская, негативно сказываются на общей надежности функционирования электроэнергетической системы в районе города Тверь.

В целях сохранения максимальной величины генераторной мощности и предотвращения нарушения питания наиболее ответственных потребителей после возникновения аварийного возмущения в Тверской энергосистеме установлен ряд устройств противоаварийной автоматики [2]. В их число входит: автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ), автоматика ликвидации асинхронного режима (АЛАР), автоматика опережающего деления сети (АОДС), автоматика ограничения снижения частоты (АОСЧ), автоматика ограничения повышения частоты (АОПЧ) и автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН).

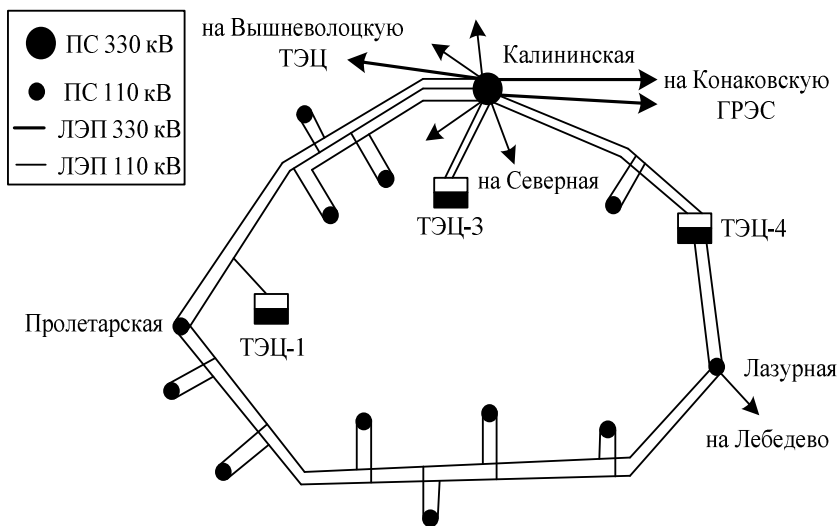


Рис. 1. Фрагмент схемы электрической сети 110 – 330 кВ Тверской энергосистемы

В докладе приведены результаты расчетов переходных процессов при возникновении нормативных аварийных возмущений в сети и выполнена оценка эффективности действия существующей противоаварийной автоматики. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса RUSTab [3].

Библиографический список

1. **Положение** по управлению режимами работы Тверской энергосистемы в операционной зоне Филиала ОАО «СО ЕЭС» Тверское РДУ. Утв. 27.03.2014.
2. **Глускин И.З.**, Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. I – М.: Знак, 2009. – 568 с.
3. **RUSTab**: руководство пользователя / В.Г. Неуймин [и др.] – М.: TSG, 2010. – 106 с.

*В.А. Новиков, маг.,
В.О. Наумов, Н.С. Колганов, студенты;
рук. А.Ю. Мурзин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА БАЗЕ
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Реальные параметры схем замещения могут существенно отличаться от рассчитанных по традиционной методике и, более того, варьируются в зависимости от режима электроэнергетической системы и метеорологических условий [1]. С учетом этого особую актуальность приобретают возможности динамического определения параметров схем замещения сетевых элементов с использованием векторных измерений.

Задача идентификации параметров нетранспонированной воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) решалась в [2] итеративно. Результаты идентификации параметров ВЛЭП с привлечением большого массива реальных данных с регистраторов синхронизированных векторных измерений (СВИ) свидетельствуют о перспективности разработанного алгоритма и дальнейшего использования.

Подход к определению актуальных параметров ВЛЭП, описанный в [2], может быть также использован и для расчета параметров схемы замещения силового трансформатора. Целью исследований является определение на базе СВИ матриц проводимостей и сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора с учетом «приведения» параметров к одной из сторон трансформатора.

Общеизвестным фактом является то, что каталожные параметры трансформаторов меняются со временем в течение срока эксплуатации при условии, что потери мощности на грузки, потери в меди, напряжение короткого замыкания и ток холостого хода не меняют своих значений [3].

Силовой трансформатор (рис. 1) представляется Т-образной схемой замещения (рис. 2) с комплексным коэффициентом трансформации, реактивным и активным сопротивлением обмоток с учетом потерь в сердечнике и сопротивлением намагничивания, а также схемы соединения обмоток трансформатора (звезды или треугольника).

На начальном этапе моделирования принимаются следующие допущения [3]: фазные обмотки и фазные контуры симметричны, контуры трансформатора линейны, следовательно не учитывается изменение магнитной проницаемости его магнитных контуров и изменение сопротивлений обмоток в зависимости от температуры; не учитываются емкости обмоток относительно земли, межвитковые, а также между обмотками; собственные сопротивления обмоток пропорциональны квадрату числа витков; приближенный учет зависимости сопротивлений контуров от изменения коэффициента трансформации трансформатора. Сопротивления заземления нулевой точки звезды включается в модель трансформатора.

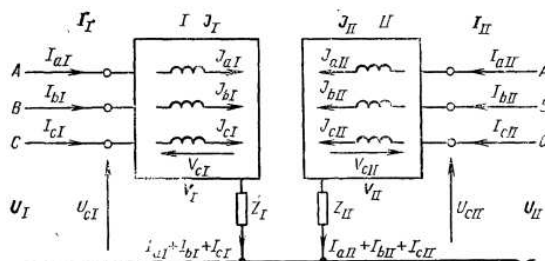


Рис. 1. Структурная схема двухобмоточного трансформатора: I, II – первичная и вторичная стороны; А, В, С – фазные выводы, Z_I, Z_{II} – сопротивления заземлений средней точки

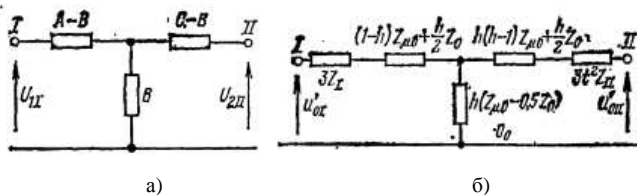


Рис. 2. Схема замещения полурезонансная прямой (обратной) последовательности (а) и нулевой (б) трансформатора Y/Y: t – коэффициент приведения, h – относительный коэффициент приведения, $Z_{\mu 0}$ – сопротивление намагничивания током нулевой последовательности, Z_0 – сопротивление рассеяния нулевой последовательности

Вычислительные эксперименты, выполненные с привлечением данных с реальных регистраторов СВИ, свидетельствуют об актуальности полученных параметров.

Библиографический список

1. **Идельчик, В.И.**, Новиков, А.С., Паламарчук, С.И. Статистическая обработка оперативной информации в электроэнергетических системах. – Иркутск, 1979. – С. 145 – 152.
2. **Иванов, И.Е.**, Новиков, В.А. Определение параметров трехфазных двухцепных линий электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений // Энергия-2016: сб. конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ. – Иваново, 2016.
3. **Бернас, С.**, Цёк, З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польск. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО АПВ В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС

В установках сверхвысокого напряжения подавляющее количество возникающих коротких замыканий (КЗ) являются однофазными, в них применяется только пофазное управление с отключением только поврежденной фазы. За счет этого, в частности, повышается динамическая устойчивость ЭЭС при однофазных КЗ.

Многие программно-вычислительные комплексы (ПВК) производят расчеты переходных режимов ЭЭС только по составляющим прямой последовательности. При этом продольная несимметрия, кратковременно возникающая в цикле действия ОАПВ, должна быть отражена в расчетной схеме ЭЭС дополнительным сопротивлением, включенным между точками разрыва. Расчет результирующего сопротивления $Z_{\Sigma MN}$ относительно точек разрыва М и N схемы замещения сложной ЭЭС представляет самостоятельную задачу при моделировании её переходных процессов и оценке устойчивости.

Большинство существующих ПВК позволяют получать основные параметры режима любого вида КЗ, включая результирующие сопротивления Z_{Σ} схем отдельных последовательностей относительно заданной точки КЗ. Использование этих сопротивлений позволяет получить результирующее сопротивление $Z_{\Sigma MN}$ для случая разрыва фазы.

На схеме (рис. 1, а) выделены точки разрыва М, N и нейтраль схемы 0. Относительно этих узлов схема может быть приведена к виду треугольника (рис. 1, б). По этой схеме сопротивление $Z_{\Sigma MN}$ относительно точек разрыва М и N определяется как

$$\frac{1}{Z_{\Sigma MN}} = \frac{1}{Z_{MN}} + \frac{1}{Z_{M0} + Z_{N0}}. \quad (1)$$

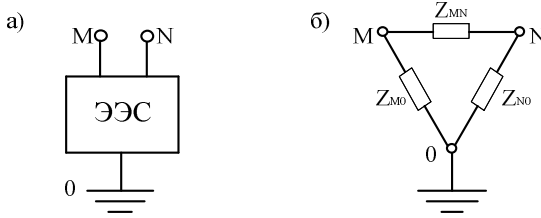


Рис. 1. Схема замещения ЭЭС: М и N – точки разрыва фазы, 0 – нейтраль

Три величины, входящие в правую часть уравнения (1), могут быть найдены по решению уравнений записанных для трёх опытов КЗ: в узле М, в узле N и в объединенном узле М-N, когда разрыв фазы отсутствует. Результирующие сопротивления $Z_{\Sigma N}$, $Z_{\Sigma M-N}$, $Z_{\Sigma M}$ для перечисленных точек КЗ могут быть найдены с применением ПВК. Данные сопротивления позволяют вычислить Z_{MN} , Z_{M0} , Z_{N0} и, таким образом, с учетом уравнения (1) решить поставленную задачу.

$$Z_{MN} = \frac{Z_{\Sigma N} \cdot Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma M} + Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma N}^2 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right)}{Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma N} + Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma M} + Z_{\Sigma N} \cdot Z_{\Sigma M}}$$

$$\frac{Z_{\Sigma M}^2 \cdot Z_{\Sigma N} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right) + Z_{\Sigma M-N}^2 \cdot Z_{\Sigma M} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right)}{Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma N} + Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma M} + Z_{\Sigma N} \cdot Z_{\Sigma M}}$$

$$+ \frac{Z_{\Sigma N} \cdot Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma M} \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right) - Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma N}}{Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma N} + Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma M} + Z_{\Sigma N} \cdot Z_{\Sigma M}}, \quad (2)$$

$$Z_{M0} = Z_{\Sigma M-N} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right), \quad (3)$$

$$Z_{N0} = \frac{Z_{\Sigma M-N}^2 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right) + Z_{\Sigma N} \cdot Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}} - \frac{Z_{\Sigma M-N} \cdot Z_{\Sigma N}^2 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma N}}}\right)}{Z_{\Sigma M-N} - Z_{\Sigma M}}. \quad (4)$$

Полученные таким образом результирующие сопротивления относительно точек разрыва схем замещения ЭЭС обратной и нулевой последо-

вательности позволяют получить дополнительное сопротивление расчетной схемы моделирования переходного режима ЭЭС при разрыве одной фазы в цикле однофазного АПВ

$$\frac{1}{Z_{\Delta}} = \frac{1}{Z_{\Sigma MN2}} + \frac{1}{Z_{\Sigma MN0}}. \quad (5)$$

Библиографический список

1. **Братолобов А.А.**, Ильичев Н.Б., Серов В.А. Применение ЭВМ для расчетов режимов сложных электроэнергетических систем: учеб. пособие. – Иваново: ИГЭУ, 1993. – 76 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С АСИНХРОНИЗИРОВАННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Для энергосистем России существует проблема обеспечения требуемых нормативами уровней напряжения в электрических сетях сверхвысокого напряжения (СВН), для решения этой проблемы принимаются специальные меры, в частности, для нормализации напряжения персонал электростанций, работающих на шины СВН, вынужден переводить турбогенераторы в режимы потребления реактивной мощности, что позволяет несколько снизить уровни напряжения, но со временем приводит к ускоренному износу этих турбогенераторов, а в ряде случаев и к аварийным отключениям из-за разрушения торцевых зон активной стали статоров, так как серийные турбогенераторы фактически не рассчитаны на эти режимы. Также для снижения напряжения используют шунтирующие реакторы, однако их установка связана со значительными затратами.

Не менее важными и все более актуальными являются проблемы повышения устойчивости и надежности электроэнергетических систем в целом, что объясняется стремлением увеличивать перетоки мощности по существующим линиям электропередачи и обеспечения транспорта электроэнергии на значительные расстояния, используя внедрение устройства продольной компенсации (УПК), что вызывает определенные трудности в режимах потребления реактивной мощности генераторами при малых перетоках мощности по линиям.

Одним из способов решения отмеченных проблем является применение турбогенераторов нового типа – асинхронизированных турбогенераторов (АСТГ). В отличие от турбогенераторов обычного типа (синхрон-

ных) АСТГ обладают существенно более высокими пределами устойчивости и предназначены для работы в режимах не только выдачи, но и глубокого потребления реактивной мощности.

В связи с вышеизложенным представляется интерес к исследованию вопроса определения предела колебательной статической устойчивости при совместной работе АСТГ и УПК.

Библиографический список

1. **Ботвинник М.М.** Асинхронизированная синхронная машина. – Государственное энергетическое издательство Москва – Ленинград, 1960.

*Л.М. Коноплева, В.Е. Кудрина, студенты;
рук. О.А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

На современном этапе развития электроэнергетики большое внимание придается созданию управляемых или гибких линий электропередачи, являющихся составной частью «интеллектуальных» (Smart Grid) сетей с устройствами FACTS. Применение электропередач переменного тока нового поколения позволит повысить эффективность функционирования электросетевого комплекса и является одним из направлений технической политики РФ [1].

К элементам устройств характеристик FACTS относятся управляемые шунтирующие реакторы (УШР) и статические тиристорные компенсаторы (СТК), обеспечивающие регулирование напряжения и требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Целью работы является анализ характеристик УШР и СТК и определение областей их применения в электрических сетях разных номинальных напряжений.

Показаны схемные особенности УШР трансформаторного типа, УШР с подмагничиванием постоянным током [2].

Рассмотрены возможности повышения пропускной способности линий электропередачи классов напряжений 220 – 750 кВ с применением СТК [3].

Проведен анализ опыта внедрения и перспектив использования управляемых средств компенсации реактивной мощности в ЕЭС России.

Библиографический список

1. **Положение** ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе, 2013.
2. **Долгополов, А.Г.**, Кондратенко Д.В., Уколов, С.В., Постолатий, В.М. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей [Электронный ресурс]: PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 3 (17) 2011. – Режим доступа http://www.elur.ru/img/doc/rudfile_294.pdf
3. **Кочкин В.И.**, Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.

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

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОВОДОВ**

В настоящее время электропотребление многих районов России постоянно растёт и в несколько раз превышает величины, заложенные в Энергетической стратегии РФ до 2020 года [1]. Значительное увеличение спроса на электроэнергию требует постоянного развития или реконструкции распределительных сетей, что связано с проблемой пропускной способности ЛЭП.

Существующие методы решения данной проблемы (строительство дополнительных ВЛ, замена проводов на большие поперечные сечения, повышение напряжения, расщепление фазы) имеют недостатки (значительные капиталовложения, временные затраты, получение разрешений на строительство, необходимость в установке дополнительных опор ЛЭП и т.д.). Следует рассмотреть применение инновационных проводов как одного из методов увеличения пропускной способности ЛЭП [2].

Целью работы является проведение сравнительного анализа характеристик новых проводов воздушных ЛЭП, влияющих на увеличение пропускной способности распределительных сетей.

Рассмотрены характеристики проводов различных компаний, специализирующихся на производстве проводов для воздушных ЛЭП (марки ACCS и ACCR, GZTACSR, AAAC UHC и др.) [3].

Проведены расчеты пропускной способности воздушных ЛЭП, выполненных традиционными проводами и проводами нового поколения, которые показали, что пропускная способность ВЛ с инновационными проводами возрастает в 1,8 – 1,9 раза.

Библиографический список

1. **Положение** ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. – М., 2013.
2. **Зуев Э.Н.** О классификации инновационных конструкций проводов воздушных ЛЭП. – М.: НИУ «МЭИ», 2013.
3. **Федоров Н.А.** Энергоэффективные провода нового поколения для высоковольтных воздушных линий электропередачи. Доклад на КПД МРСК Северо-Запада. – М., 2014.

*В.Д. Макаров,
А.С. Кривчикова, студенты;
рук. А.А. Братолобов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НАГРУЗКИ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НА НАВЕДЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ
В ОТКЛЮЧЕННОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ**

Отключенная для ремонта воздушная линия (ВЛ) электропередачи может оказаться под наведенным напряжением за счет магнитной связи с соседними ВЛ, находящимися в работе (влияющие ВЛ). Поэтому существуют опасность для жизни и здоровья персонала, занятого ремонтом отключенных ВЛ. Статистика в этой области весьма печальна.

Действующие нормы и правила по безопасной организации ремонтных работ ВЛ предписывают составлять в каждой организации специальный перечень линий, на которых наведенное напряжение может оказаться выше 25 В при заземлении линии по ее концам, т.е. опасным для персонала. Работа на таких ВЛ относится к разряду работ под наведенным напряжением и выполняются с соблюдением специальных мер безопасности.

Для составления перечня линий с опасным наведенным напряжением, нормами предписано выполнять замеры наведенного напряжения и его расчеты в режимах с наибольшим током во влияющих ВЛ.

Однако величина модуля тока влияющих ВЛ – не единственный фактор, определяющий значение наведенного напряжения в отключенной ВЛ. В работе показано, что при неизменном модуле тока влияющих ВЛ (рис. 1), но разных коэффициентах мощности нагрузки влияющих линий, значения наведенного напряжения могут отличаться в несколько раз (рис. 2).

В качестве примера рассмотрена двухцепная ВЛ-220 кВ (рис. 1), одна из цепей которой отключена и заземлена, влияющая цепь имеет два участка с неизменными по амплитуде токами 370 А и 396 А. На рис. 2 показано распределение наведенного напряжения одной из фаз по длине от-

ключенной цепи при предельных значения (1 и 0) коэффициенты мощности влияющей цепи ВЛ.

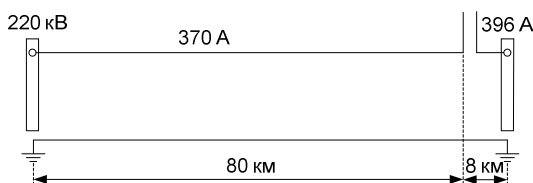


Рис. 1. Схема ВЛ

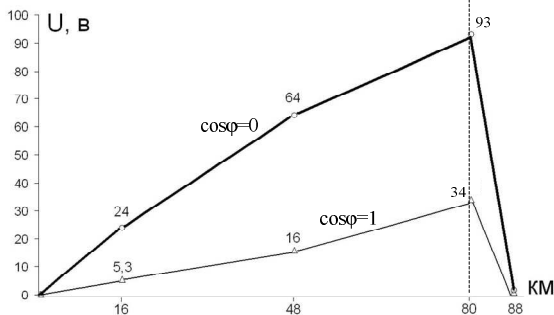


Рис. 2. Распределение наведенного напряжения вдоль отключенной ВЛ

Моделирование проводилось в системе MathLab/Simulink (рис. 3).

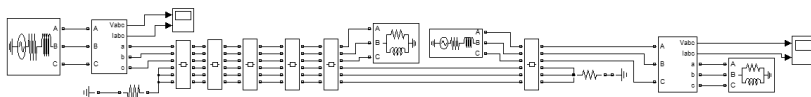


Рис. 3. Схема моделирования в Simulink

Результат исследования показывает, что величина наведенного напряжения при неизменных модулях тока влияющих ВЛ может в значительной степени изменяться в зависимости от коэффициента мощности от коэффициента мощности нагрузки влияющих ВЛ. Поэтому ток влияющих линий при составлении перечня ВЛ с опасным наведенным напряжением должен учитываться не только своим модулем, но и фазовым углом.

Библиографический список

1. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. ПОТ Р М-016-2013, РД 153-34.0-03.150-00 / Министерство труда и социального развития РФ, Министерство энергетики. РФ. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2013.– 192 с.

2. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Переиздание (июнь 2001 г.) с Изменением № 1.

3. МЭК 60479-10.

*Д.И. Шатохина, студ.;
рук. Д.Н. Кормилицын, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ СИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ЭЭС С УПРАВЛЯЕМОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Применение управляемых устройств продольной компенсации (УУПК) позволяет повышать предел передаваемой мощности, что позволяет в большинстве случаев отказаться от строительства дополнительных ЛЭП. [1] Кроме того, УУПК может применяться для управления потоками мощности по параллельно работающим линиям. Однако установка данных устройств усложняет релейную защиту таких управляемых линий. Соответственно необходимо проанализировать как наличие УУПК влияет на величину трехфазных токов короткого замыкания, используемых для настройки релейной защиты данных линий.

Целью данной работы является определение токов коротких замыканий отдельных элементов ЭЭС при появлении симметричных КЗ в различных точках при применении управляемого устройства продольной компенсации на дальней линии электропередачи сверхвысокого напряжения (ДЛЭП СВН).

В качестве исследуемой рассматривается простейшая электроэнергетическая система, состоящая из эквивалентного блока генератор-трансформатор, подключенного через управляемую линию электропередачи к системе (рис. 1). Устройство УУПК находится в середине линии, на его выводах установлены ШР.

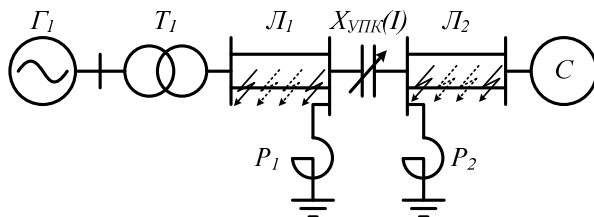


Рис. 1. Исследуемая простейшая электроэнергетическая система

Регулирование УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока в линии [2]:

$$X_{УПК}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 I)}.$$

На разработанной в среде программирования С++ математической модели электроэнергетической системы произведен расчет установившихся режимов, а также режимов симметричных коротких замыканий. Получены зависимости токов КЗ в различных элементах от удаленности КЗ, а также от закона регулирования УУПК.

Результаты свидетельствуют о том, что применение управляемого устройства продольной компенсации увеличивает токи КЗ практически во всех элементах, что требует перенастройки устройств релейной защиты при установке УУПК на существующую ДЛЭП СВН.

Библиографический список

1. **О применении** устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России / А.В. Антонов, В.К. Фокин, Е.В. Тузлукова // Энергия единой сети. – 2016. – № 6 (29). – С. 26 – 41.

2. **Регулирование** мощности шунтирующих реакторов для улучшения устойчивости энергосистемы с управляемым устройством продольной компенсации / Н.Е. Введенский, В.П. Голов, А.С. Казарин [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 49 – 56.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ РАСЧЕТА НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Правилами по охране труда при эксплуатации электроустановок [1] определены меры безопасности во время работ на ВЛЭП, на которых наводится дополнительное напряжение от соседних работающих линий. Отдельно выделены меры безопасности при работах на таких ВЛ, когда заземление их в соответствии с общими требованиями правил не позволяет снизить уровень наводимого на отключённых проводах потенциала ниже 25 В.

Известно, что на любой ВЛ, проходящей параллельно с другими ВЛ, непрерывно наводится сторонний потенциал, обусловленный взаимным влиянием электромагнитных полей этих линий друг на друга. Значение потенциала зависит от рабочего напряжения, токов нагрузки, расстояния между фазными проводами линий и длины участка параллельного их расположения.

В работе показано, что необходимо учитывать заземление линии при выводе в ремонт одной цепи двухцепной линии, т.к. на ней наводится сторонний потенциал. На рис. 1 представлена структурная схема моделирования сети, с помощью программы SIMULINK, процессов в ВЛ, одна из цепей которой выведена в ремонт. Рассматривается ВЛ–376 напряжением 330 кВ ПС «Южная» Ленинградской сети протяженностью 42,4 км. Вторая цепь этой передачи являлась влияющей линией. Обе цепи подвешены на общих опорах типа У330–2Т+9. При моделировании учитывалась распределенность параметров по длине линии выполненных проводами марки 2хАСО-400.

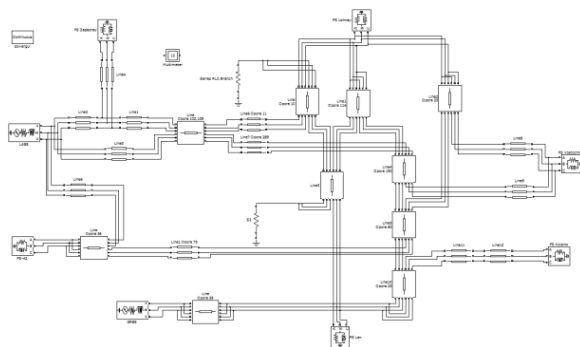


Рис. 1. Структурная схема моделирования

Таблица 1. Изменение напряжения вдоль выведенной в ремонт линии

Название участка	Величина	Название участка	Величина
U_in_phase_4: Line Opora 10	0.51 V _{rm}	U_in_phase_1: Line3	9.43 V _{rms}
U_in_phase_5: Line Opora 10	0.51 V _{rm}	U_in_phase_2: Line3	8.90 V _{rm}
U_in_phase_5: Line Opora 10	0.51 V _{rm}	U_in_phase_3: Line3	10.60 V _{rm}
U_out_phase_4: Line Opora 10	9.43 V _{rms}	U_out_phase_1: Line3	0.55 V _{rm}
U_out_phase_5: Line Opora 10	8.90 V _{rm}	U_out_phase_2: Line3	0.55 V _{rm}
U_out_phase_6: Line Opora 10	10.60 V _{rm}	U_out_phase_3: Line3	0.55 V _{rm}

Из приведенного расчета видно, что при заземлении отключенной линии с двух сторон, напряжение, которое наводится со стороны второй линии, не превышает допустимых значений.

На всем протяжении линии напряжение не превышает 10 В, по концам линии, в местах заземления, напряжение не превышает 0,6 В. Исходя из данных результатов можно сделать вывод, что данная линия не входит в перечень линий под наведенным напряжением и проводить работы на ней разрешено в обычном режиме.

Проблемы наведенного напряжения очень актуальны в электроэнергетике, и их решение немаловажная задача. Проведя несколько опытов

можно сделать вывод, что при отключении одной из линий, в другой ВЛ непрерывно наводится сторонний потенциал, обусловленный взаимным влиянием электромагнитных полей этих линий друг на друга. Для того чтобы значение этого потенциала было минимальным, необходимо обязательно заземлять отключенный элемент.

Библиографический список

1. **Правила** по охране труда при эксплуатации электроустановок / Министерство труда и социальной защиты РФ, от 24 июля 2013 года N 328н, с изменениями на 19 февраля 2016 года, редакция, действующая с 19 октября 2016 года.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ СТАНЦИИ С ДВУМЯ СИНХРОННЫМИ МАШИНАМИ, ПИТАЮЩИХ ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Исследованию подлежит вопрос о статической устойчивости системы, состоящей из двух синхронных машин, питающих общую нагрузку с заданными характеристиками, и приемной системы. Для исследуемой системы это значит, что при достаточно малом нарушении данного установившегося режима последующий неустановившийся режим системы должен сколь-угодно мало отличаться от нарушенного. Если данный установившийся режим этому условию удовлетворяет, то система будет статически устойчивой [1].

Настоящая работа имеет целью определение той предельной мощности, которая может быть подана в приемную систему по данной передаче.

Простейшая эквивалентная схема, к которой может быть приведена задача, состоит из двух синхронных машин с разными мощностями, работающих на общие шины, к которым подключена нагрузка с заданными характеристиками (рис. 1) [2].

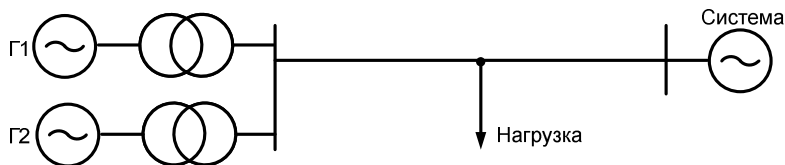


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

Для достижения поставленной цели в работе решается следующая основная задача – разработка полной математической модели ЭЭС (с учетом электромагнитных переходных процессов в ее элементах) в осях d и q .

Для решения поставленных задач в работе использовались методы математического моделирования ЭЭС, теория дальних линий электропередач, теория электромеханических переходных процессов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем.

Библиографический список

1. **Горев, А.А.** Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем. – Государственное энергетическое издательство Москва – Ленинград, 1960. – С. 10 – 12.
2. **Голов, В. П.** Анализ статической устойчивости электроэнергетической системы / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, З.В. Семеновская // Электроэнергетика: тез. докл. регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Иваново, 20 – 21 апреля 2006 г. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2006. – С. 11 – 13.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЭС, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ СТАНЦИИ С ДВУМЯ СИНХРОННЫМИ МАШИНАМИ, ПИТАЮЩИХ ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Одной из важнейших характеристик электропередачи является ее пропускная способность, поскольку она определяет экономические показатели и режим электроэнергетической системы. Одним из путей ее повышения и улучшения устойчивости электрических систем является применение регулируемых устройств продольной компенсации (УПК). Анализ статических и динамических характеристик электрической системы при использовании регулируемого УПК, показал возможность и достаточно высокую эффективность этого мероприятия в плане повышения пределов передаваемой мощности, улучшения апериодической статической и динамической устойчивости системы.

Исследуемая система представляет собой одну электрическую станцию с двумя генераторами и трансформаторами, которые работают на общую нагрузку и связаны дальней линией электропередачи сверхвысокого напряжения с управляемым устройством продольной ёмкостной компенсации с системой. Генераторы на станции установлены разной мощности.

Для исследования влияния возмущений на работу генераторов с разной мощностью и на динамическую устойчивость ЭЭС была составлена математическая модель в осях d и q с учетом электромагнитных переходных про-

цессов во всех элементах. В программном комплексе MATLAB смоделирован сброс и наброс нагрузки, а также трехфазное КЗ. Для упрощения вначале были представлены генераторы и трансформаторы одним эквивалентным генератором и трансформатором на электрической станции.

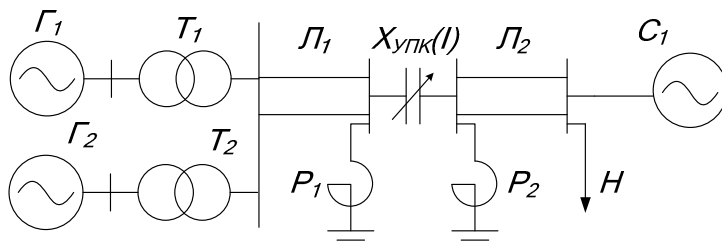


Рис. 1. Исследуемая электроэнергетическая система

В качестве проверки полученных результатов выполнены расчеты переходных процессов в ЭЭС. Для значений коэффициентов регулирования, находящихся в устойчивой и неустойчивой областях показаны характеры изменения режимных параметров в обоих случаях.

Библиографический список

1. **Голов В.П.** Анализ устойчивости электрической системы с регулируемым УПК / В.П. Голов, А.А. Мартиросян // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., 8 – 10 июня. – Иваново, Ивановский государственный энергетический университет, 1999. – С. 40.

2. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

*Н.Е. Введенский, А.С. Казарин, студенты;
рук. Д.Н. Кормилицын, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЛОКОМ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Современные электроэнергетические системы, включающие в себя дальние электропередачи СВН, характеризуются широкими диапазонами рабочих режимов, что ведет к необходимости обеспечения баланса реак-

тивной мощности с целью поддержания требуемых уровней напряжения в узлах сети. Для решения указанной проблемы могут применяться различные устройства, в том числе установки продольной или поперечной компенсации, а также управляемые шунтирующие реакторы, что приводит к росту пределов передаваемой мощности и к улучшению устойчивости системы. Возможными вариантами таких компенсирующих устройств являются УУПК в середине электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами, что и рассматривалось в данной работе. Все эти устройства превращают линию электропередачи из пассивного элемента электроэнергетической системы в элемент активно-адаптивной сети.

Целью данной работы является исследование влияния комплексного управления устройствами УУПК и УШР на динамическую устойчивость 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.

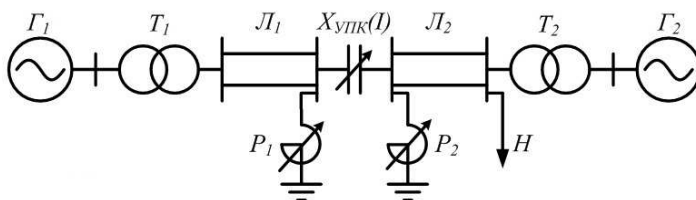


Рис. 1. Исследуемая электрическая схема

Для оценки влияния комплексного управления УУПК и УШР на динамическую устойчивость системы были введены следующие законы регулирования:

$$x_{UUPK}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 \cdot (K_1 - K_2 \cdot I)};$$

$$\Delta X_{UШР} = -K_{UШР} \cdot (U - U_0).$$

В результате анализа динамической устойчивости при рассмотрении «большого» возмущения в виде наброса мощности на генераторы станции 1, было выявлено положительное влияние регулируемого УПК и УШР на переходный процесс: уменьшаются величины вылета взаимного угла в первом цикле качаний, колебания режимных параметров системы,

в частности колебания напряжений на выводах УПК, затухают быстрее, уменьшаются «просаживания» напряжения после возмущения, по сравнению с другими случаями.

Анализ переходных процессов исследуемой системы при «больших» возмущениях показал увеличение пределов передаваемой мощности по условию сохранения динамической устойчивости при использовании комплексного управления блоком продольной компенсации.

Библиографический список

1. **Устойчивость** электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 26 – 31.

2. **Сажеников А.В.** Статические характеристики электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Электричество. – 2006. – № 3.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В настоящее время большая протяженность воздушных линий электропередачи обуславливает отчуждение под воздушные линии (ВЛ) и подстанции значительных территорий. Зачастую воздушные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения (ВЛЭП СВН) проходят по садовым участкам, вблизи жилых зон. В условиях постоянно увеличивающегося электромагнитного фона задача оценки влияния ВЛЭП СВН на окружающую среду и население становится все более актуальной.

Действие электрического и магнитного полей на организм человека еще не до конца изучено, однако их влияние на окружающую среду и живые организмы подтверждены исследователями, работающими в области медицины и биологии.

Среди всех мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной безопасности, наиболее эффективными, как правило, являются инженерно-технические, основанные на таком явлении как экранирование. К таким мероприятиям можно отнести применение тросовых экранов, разработку конструкций ВЛ со сниженным уровнем ЭМИ, переоборудование нескольких параллельных одноцепных ВЛ в многоцепные.

Вышеперечисленные мероприятия не всегда легко реализуемы и часто требуют значительных капитальных затрат. В связи с этим возникает

необходимость в разработке новых инженерных методик расчета и анализа распределения электромагнитных полей ЛЭП, позволяющих обоснованно подходить к выбору мероприятий по уменьшению негативного влияния электромагнитных излучений на биологические объекты.

Целью исследовательской работы является расчет и анализ распределения электрических полей промышленной частоты, создаваемых воздушными ЛЭП, в программном комплексе ANSYS Maxwell 3D для определения уровня их опасности в отношении живых организмов с последующей разработкой, при необходимости, защитных мероприятий, таких как экранирование.

Точный расчет напряженности электрического поля в программном комплексе ANSYS Maxwell 3D при моделировании реальной линии электропередачи имеет достаточно большую продолжительность, которая напрямую зависит от сложности моделируемого объекта. По этой причине для упрощения расчета целесообразно выполнить замену реального провода его цилиндрической моделью, что в несколько раз сокращает продолжительность расчета. Для проверки возможности указанной замены был произведен расчет распределения напряженности электрического поля, создаваемого реальным проводом АС-330/42 и его упрощенной моделью.

Напряженность электрического поля провода максимальна вблизи выступающих наружных участков проводников. По мере удаления от провода напряженность электрического поля снижается и постепенно становится равной напряженности поля упрощенной цилиндрической модели провода.

Таким образом, замена реального провода цилиндрической моделью значительно сокращает время вычислений, не уменьшая при этом саму точность вычислений. При последующей оценке распределения напряженности электрического поля ВЛЭП с учетом действия тросовых экранов фазные проводники линии и экранирующие тросы заменены их цилиндрическими моделями.

При внесении в электрическое поле незаряженного проводника (тросового экрана) вследствие электрической индукции в проводнике происходит перераспределение зарядов, в результате чего в нем создается внутреннее электрическое поле, направленное встречно внешнему электрическому полю. При этом внешнее электрическое поле искажается.

Если подать на тросовый экран заряд, противоположный по знаку заряду на проводе, конфигурация поля существенно изменится.

Напряженность поля в пространстве выше тросового экрана существенно возрастает, а ниже троса в промежутке между тросом и землей уменьшается. Таким образом, происходит компенсация внешнего электрического поля, создаваемого проводом. Введение даже незаряженного проводника (тросового экрана) искажает конфигурацию электрического поля в промежутке между проводом и землей.

Библиографический список

1. **Обеспечение** электромагнитной безопасности линий электропередачи / Фоменко Н.А., Мурзин А.Ю., Словесный С.А. // Энергия. – 2016. – Иваново: ИГЭУ.
2. **Обеспечение** электромагнитной безопасности электросетевых объектов / Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. – М.: Наука, 2010. – 868 с.

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

БОЛЬШЕ ПРОГРАММ, ХОРОШИХ И РАЗНЫХ

Лабораторные работы – один из видов учебной деятельности, дающий студентам наиболее наглядное представление об изучаемой дисциплине. Некоторые узконаправленные дисциплины требуют для проведения лабораторных работ специализированное программное обеспечение (ПО). Задача своевременного обновления и совершенствования ПО является крайне важной для полноценной подготовки студентов [1].

ПО для курса «Переходные процессы в ЭЭС» нуждалось в модернизации, в связи с чем было принято решение заняться разработкой новых программ на основе существующих математических моделей, но с применением современных программных средств и возможностей.

Программный продукт для курса «Электромеханические переходные процессы» SSST уже была выпущена и зарегистрирована в реестре государственных программ для ЭВМ [2]. При этом поддержка и сопровождение программы будет продолжено. В ближайшее время планируется обновление с введением новых функций.

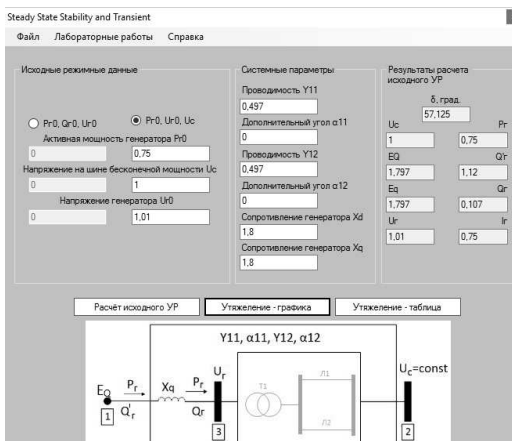


Рис. 2. Главное окно программы SSST

Программа по курсу «Электромагнитные переходные процессы» пока находится на этапе доработки, её издание планируется к моменту начала лабораторных занятий у студентов.

КЗ в цепи трехфазного тока при исходном режиме холостого хода

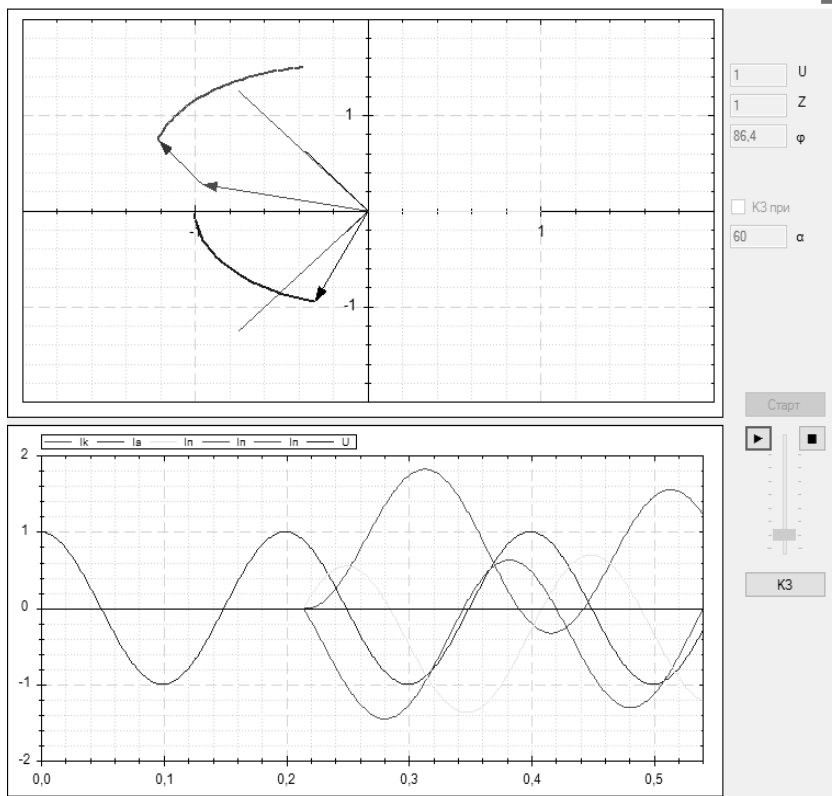


Рис. 2. Опыт исследования явления ударного тока

В дополнение к программам будут выпущены новые методические указания для лабораторных работ и новые учебные пособия.

Библиографический список

1. **Применение** ЭВМ в учебных расчетах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем / Братолобов А.А., Огорельшев Н.А., Аржанникова А.Е. – 2006.

2. **Сидоров А.В.**, Москвин И.А., Кормилицын Д.Н., Братолобов А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201660082, 2016.

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

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МАТЛАБ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Моделирование электроэнергетической сети в среде Matlab позволяет выполнить расчет установившегося режима и рассмотреть различные нарушения и пути их решения. Одной из проблем является несимметрия трехфазной системы напряжений, как естественной, так и обусловленной несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети. Показателем качества электроэнергии является коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} .

Естественная несимметрия напряжения обусловлена конструкцией линии, фазные провода на опоре расположены несимметрично, из-за этого сопротивления фаз различны. Для симметрирования сопротивлений проводят транспозицию фазных проводов, что требует сооружения специальных транспозитных опор.

Для устранения несимметрии применяют следующие средства обеспечения качества электроэнергии: симметрирование нагрузки по фазам, симметрирующие устройства (СУ) на базе конденсаторов и реакторов, транспозиция линейных проводов воздушной линии, средства контроля качества электроэнергии (СИ ПКЭ), статические синхронные компенсаторы и индуктивно-ёмкостные накопители.

В данной работе проводится исследование электроэнергетической сети с напряжениями 500, 220 и 110 кВ. Выполняется расчет установившегося и послеаварийного режимов в результате короткого замыкания. Проводится анализ влияния несимметрии напряжения и короткого замыкания на режимные параметры сети.

В ходе исследования разработана необходимая схема электроэнергетической сети в программном комплексе SIMULINK. Ведутся исследования возможности повышения качества электроэнергии за счёт использования средств, позволяющих снизить влияние несимметрии напряжения.

Библиографический список

1. **Карташев И.И.** Управление качеством электроэнергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 302 с.
2. **ГОСТ 32144–2013** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПАКТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ЛИНИЯМИ ТРАДИЦИОННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Актуальной задачей в области электроэнергетики является создание интеллектуальных электроэнергетических систем, основой которых должны быть управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии электропередачи (УСВЛ) [1 – 2].

Компактные управляемые ВЛ отличаются от ВЛ традиционного исполнения тем, что повышенная пропускная способность у них достигается за счёт компактной конструкции и фазового сдвига между векторами напряжения сближенных фаз.

Компактные ВЛ позволяют [3]:

- повысить в 1,3 – 1,6 раза пропускную способность ВЛ;
- снизить удельные капитальные затраты на строительство в расчёте на единицу передаваемой мощности на 15 – 30 %;
- улучшить экологические показатели за счет уменьшения напряженности электромагнитного поля в коридоре прохождения ВЛ и близости границ зон отчуждения.

Целью работы является сравнительный анализ параметров компактных ВЛ 220 кВ различной конструкции с ВЛ традиционного исполнения.

Увеличение пропускной способности ВЛ при сближении фаз вытекает из зависимости величины предела передаваемой мощности от основных параметров линии, которая обратно пропорционально значению волнового сопротивления.

Волновое сопротивление, в свою очередь, зависит от расстояния между фазами, параметров расщеплённых фаз: радиуса проводов, числа составляющих, эквивалентного радиуса расщепления фазы; а также конфигурации расположения фаз и общих габаритов опор ВЛ.

Для двухцепных ВЛ кроме указанных факторов основными влияющими являются – расстояние между цепями и угловой сдвиг между цепями и угловой сдвиг между системами векторов напряжений фаз цепей [4 – 5].

Рассмотрены аспекты фазового регулирования углового сдвига трехфазных систем напряжений, приложенных к сближенным цепям.

Проведенные расчеты показали, что при принятых сопоставимых условиях ВЛ-220 кВ нового поколения по величине натуральной мощности превосходят аналогичные ВЛ-220 кВ (двухцепные традиционного типа) в 1,5 – 2 раза (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение характеристик компактных ЛЭП с традиционными

Тип ВЛ	Одноцепная компактная	Двухцепная компактная	Двухцепная УСВЛ		Двухцепная традиционная	
Число цепей	1	2	2		2	
Марка провода	АС-300/66					
Число проводов в фазе	2			1		
Угол сдвига фаз, °	0°	120°	120°	180°	---	
Удельные параметры линии	r_0 , Ом/км	0,051	0,049	0,049	0,049	0,051
	x_0 , Ом/км	0,236	0,262	0,248	0,248	0,211
	$b_0 \cdot 10^{-6}$, См/км	4,66	4,32	4,44	4,44	5,358
Волновое сопротивление, Ом	226,4	123,7	118,9	107,8	206,3	
Натуральная мощность, МВт	277,9	509,0	529,0	583,0	304,6	
Удельная зарядная мощность, Мвар/км	0,296	0,548	0,564	0,621	0,34	
Ширина коридора Лк, м	43,0	60,7	57,3		64	
Стоимость одного км в расчете на 1 МВт, тыс.руб./МВт	5,93	5,13	4,87	4,42	7,2	

Результаты работы планируется использовать в проектных работах развития конкретных электроэнергетических систем.

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.**, Быкова Е.В., Сулов В.М. Управляемые компактные линии электропередачи высокого напряжения // Проблемы региональной энергетики. – 2016. – № 1 (30).
3. **Вариводов В.Н.** Компактные высоковольтные линии электропередачи / В.Н. Вариводов. – М.: ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006 – № 2 – С. 2 – 6.
4. **Постолатий В.М.**, Сулов В.М. Теоретические аспекты выбора оптимальных параметров конструкций линий электропередачи переменного тока нового поколения // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – № 1.
5. **Александров Г.Н.** Воздушные линии электропередачи повышенной пропускной способности / Г.Н. Александров. // Электричество. – 1981. – № 7. – С. 1 – 6.

СЕКЦИЯ 13

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

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

И.А. Калякин, студ.;
рук. Д.П. Андрианов, к.т.н., доц.
(ВлГУ, г. Владимир)

АНАЛИЗ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Электроснабжение промышленного предприятия можно рассматривать как совокупность связей между структурными единицами: линия высокого напряжения (ЛЭП) – главная понижающая подстанция (ГПП) – цеховая понижающая подстанция (ГП) – потребители электроэнергетики.

В качестве потребителей электроэнергии выступает электрооборудование: технологические установки, станочное оборудование, приводы механизмов. Привод (исполнительный механизм) для выполнения своих функций должен развивать некоторую мощность, которая затрачивается на перемещение грузов, преодоление усилий сопротивления и т.д. С точки зрения электротехники эту мощность можно представить через параметры электрического тока

$$P = U \times I,$$

где I – сила тока; U – напряжение.

При рассмотрении процесса электропитания как стационарного (напряжение в сети считаем неизменным) выработка полезной мощности определяется силой тока, или с учетом закона Ома, некоторым сопротивлением Z_{Π} , т.е. сопротивление Z_{Π} выступает эквивалентом механической нагрузки

$$P = \frac{U^2}{Z_{\Pi}}$$

С точки зрения электрических процессов основным элементом конструкции приводов (электродвигателей) является катушка индуктивности, а сопротивление потребителя Z_{Π} представляется как вектор.

$$Z_{\Pi} = R + jX_L,$$

R – активное сопротивление; j – мнимая единица; X_L – реактивное сопротивление.

$$X_L = \omega \times L,$$

ω – циклическая частота; L – индуктивность.

Наличие X_L приводит к сдвигу фаз колебаний напряжения и силы тока (появляется реактивная мощность). Чем меньше Z_{Π} (в идеале равно R), тем больше полезная мощность. Компенсация реактивной мощности (сведение к минимуму или нулю) возможно за счет установки в электрические цепи емкостей (конденсаторных батарей).

С учетом вышесказанного схема замещения электрической цепи предприятия представляется как совокупность активной и реактивной нагрузок потребителей (рис. 1).

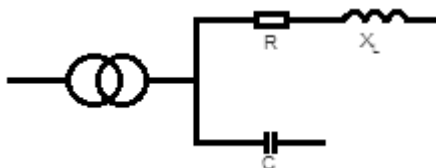


Рис. 1. Схема замещения электрической цепи

Присоединение потребителей к системе электроснабжения возможно по двум основным схемам: магистральной (рис. 2, а) или радиальной (рис. 2, б) или комбинированной.

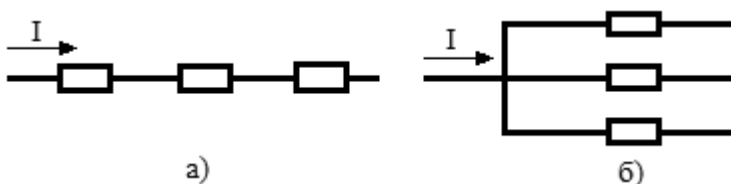


Рис. 2. Схемы соединений потребителей: а – магистральная, б – радиальная

$$I = \frac{U}{\sum_{i=1}^n (R_i + jX_i)} I = \sum_{i=1}^n \frac{U}{R_i + jX_i}$$

Установка конденсаторных батарей приводит к изменению общего реактивного сопротивления.

Для магистральных схем:

$$X_{\text{ЭКВ}} = \sum X_i - X_C$$

Для радиальных схем:

$$\frac{1}{X_{\text{ЭКВ}}} = \sum \frac{1}{X_i} - \frac{1}{X_C}$$

Использование данных зависимостей требует корректного подхода, т.к. зависимости носят нелинейный характер и применение принципа суперпозиции недопустимо.

Библиографический список

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – М.: КНОРУС, 2014. – 648 с.

И.А. Соколова, студ.;
рук. М.В. Петрова, к.т.н., доц.
(УлГТУ, г. Ульяновск)

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КАК ТЕХНОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Вопрос о компенсации реактивной мощности, непосредственно связан с повышением качества электроэнергии в сетях. Решение этого вопроса необходимо рассматривать, начиная с проектирования, а затем и во время эксплуатации систем промышленного электроснабжения. Исходя из этого, компенсация реактивной мощности может быть в полной мере названа одной из технологий энергосбережения.

Передача реактивной мощности на расстояния от мест производства до мест потребления значительно ухудшает показатели систем электроснабжения.

Реактивная составляющая неизбежна при работе многих промышленных устройств, поэтому она не может быть исключена полностью, однако целесообразно применять средства, предназначенные для уменьшения ее потребления из питающей сети.

Одним из перспективных решений одновременной компенсации реактивной мощности и мощности искажения при преобразовании переменного тока является использование активного выпрямителя, выполненного на полностью управляемых силовых переключающих элементах IGBT-транзисторах.

Исследование влияния частоты коммутации компенсирующего преобразователя на характер изменения тока и напряжения при различных частотах проведено с использованием пакета программ МВТУ версии 3.7. Результаты моделирования подтвердили целесообразность использования преобразователя для компенсации реактивного тока при изменении нагрузки от 0 до номинальной с коэффициентами мощности от 0,7 до 1. Динамические показатели компенсатора по данным моделирования значительно отличаются от расчетных. Так время переходного

процесса изменения тока $i_k(t)$ вместо расчетного значения в 2,5 полупериода сетевого напряжения оказывается равным 4 – 5. Существенного значения для практики это не имеет, а расхождение объясняется несоответствием оценок длительности переходных процессов в системах переменного тока по постоянным времени как это принято в системах постоянного тока.

Моделирование показало, что компенсатор обеспечивает также компенсацию мощности искажения, в частности, обеспечивает потребление из сети синусоидального тока при наличии среди нагрузки выпрямительной установки.

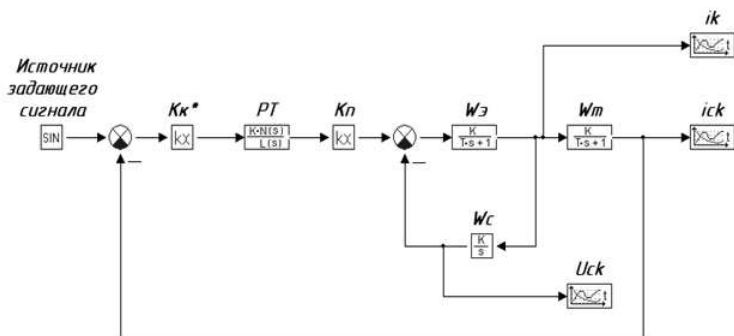


Рис. 1. Структурная схема компенсатора в программе МВТУ

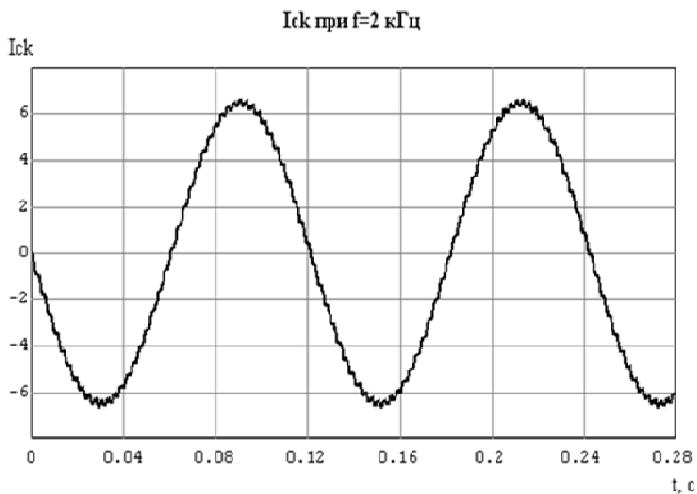


Рис. 2. Ток компенсации при частоте коммутации 2 кГц

По полученным результатам моделирования можно сделать вывод, что с увеличением частоты коммутации получаются наиболее гладкие формы токов, но с увеличением частоты коммутации, увеличиваются потери в компенсаторе, поэтому оптимальной частотой коммутации является частота 2 кГц.

*С.Б. Бусыгин, курсант;
рук. О.Е. Белов, к.т.н., доц.
(ВИ(ИТ) ВАМТО, г. Санкт-Петербург)*

АВТОНОМНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАТОРОВ С ВОДОРОДНЫМ ПЕРВИЧНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Состояние вопроса. Рассматривается вопрос принципиальной возможности построения и применения автономных постоянно действующих систем генерации электрической энергии в условиях отсутствия или невозможности использования централизованных систем электроснабжения. Рассматриваемые автономные постоянно действующие системы генерации электрической энергии предлагается строить на основе использования солнечной радиации (фотоэлектрические источники или солнечные батареи), далее выделение из воздуха водорода и накоплением его в ёмкостях (создание запаса «первичного топлива») и выработку в сеть требуемого количества электроэнергии с применением источников в которых в качестве первичного топлива используется водород.

Материалы и методы. Исследование технической возможности и экономической целесообразности применения фотоэлектрических систем на основе генераторов с водородным первичным двигателем в системе моделирования Excel, с учётом статистических данных.

Результаты. Разработана принципиальная схема построения фотоэлектрические системы электроснабжения на основе генераторов с водородным первичным двигателем.

Выводы. Результаты исследований могут быть применены при организации автономного электроснабжения в условиях отсутствия или невозможности использования централизованных систем электроснабжения.

Библиографический список

1. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
2. Хоровиц Н. Поиски жизни в солнечной системе . пер. с англ. под ред. и с предисл. М.С. Крицкого. – М.: Мир, 1988. – 188 с.

3. Жуков Г.Ф. Общая теория энергии. – 1995.
4. Григорьев В.А. Зорин В.М. Тепловые и атомные электрические станции справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 608 с.

М.Ю. Русяева, студ.;
рук. И.И. Артюхов, д.т.н., проф.
(СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов)

УМЕНЬШЕНИЕ ПУСКОВЫХ ТОКОВ МНОГОПОЛЮСНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

На компрессорных станциях магистрального транспорта газа получили широкое применение многополюсные асинхронные двигателя (АД), в частности, серии ВАСО мощностью 37 кВт. Эти двигатели осуществляют привод вентиляторов в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) газа. Благодаря большому количеству пар полюсов ($p = 12$) скорость вращения ротора близка к 250 об/мин, что позволяет устанавливать вентиляторы непосредственно на вал АД.

Результаты исследования переходных процессов при пуске таких АД показали, что из-за большой инерционности мехатронной системы эти процессы происходят в течение нескольких секунд и сопровождаются перегрузкой источника питания [1].

Изучение возможности уменьшения пусковых токов за счет ступенчатого увеличения напряжения на статорных обмотках многополюсных АД дало отрицательный результат. Результаты имитационного моделирования показали [2], что пуск АД лишь затягивается во времени. При этом было доказано, что реактивная составляющая полного тока АД в переходном режиме превышает активную составляющую в 4,4 раза. Поэтому для уменьшения пускового тока представляет интерес применение устройств динамической компенсации реактивной мощности.

На рис. 1 показана схема имитационной модели для исследования переходных процессов при пуске многополюсного АД при оснащении электропривода устройством динамической компенсации (УДК). В ранее разработанную схему [2] включены добавочные блоки Three-Phase Parallel RC Load, имитирующие батареи статических конденсаторов (БСК). Их суммарная мощность соответствует той, которую необходимо скомпенсировать в начальный момент пуска АД двигателя. Блоки соединены с сетью через трехфазные ключи, представленные блоками Three-Phase Breaker, в которых задается время отключения секции БСК.

Из графиков (рис. 2) видно, что за счет динамической компенсации реактивной составляющей тока АД происходит снижение тока источника питания.

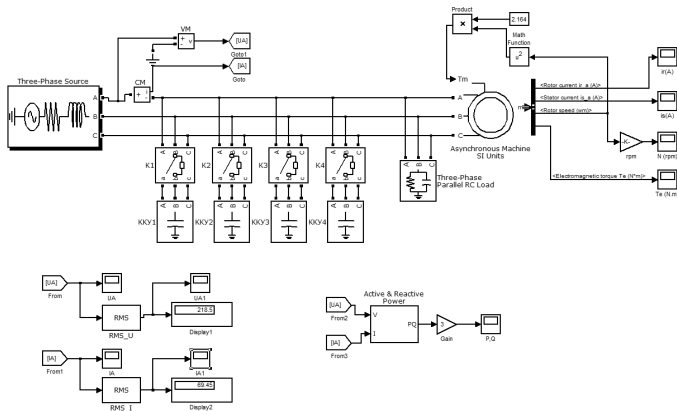


Рис. 1. Имитационная модель системы динамической компенсации реактивной мощности

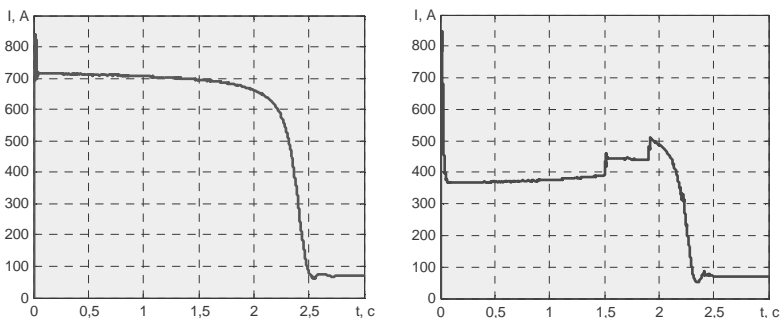


Рис. 2. Графики изменения действующего значения тока источника питания до и после применения устройства динамической компенсации реактивной мощности

К недостатку рассмотренной схемы можно отнести невозможность плавной регулировки реактивной мощности УДК. Этот недостаток может быть устранен за счет применения устройств, включаемых параллельно БСК и позволяющих плавно изменять реактивную мощность индуктивного характера.

Библиографический список

1. Аршакян И.И., Артюхов И.И. Динамические процессы в системах электроснабжения установок охлаждения газа. – Саратов: СГТУ, 2004. – 120 с.
2. Шмигель М.Р., Русяева М.Ю., Артюхов И.И) // Энергия-2016: мат. XI междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – В 6 т. Т. 4. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2016. – С. 5 – 7.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАРУШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПАКЕТЕ MATLAB SIMULINK

Экспериментальная проверка и анализ режимов работы устройств обеспечения качества электроэнергии (КЭ) представляет собой достаточно трудоёмкую и дорогостоящую задачу, которая возникает на этапе проектирования подобных сложных схем. Существенную помощь в решении данного вопроса может оказать замена реального устройства его компьютерной моделью.

В настоящее время существует большое количество универсальных программ для моделирования нарушения КЭ. Среди существующих программ наиболее широкими возможностями обладает пакет Matlab/Simulink. Он объединяет в себе возможности различного вида анализа, синтеза, расчёта и конструирования схем электронных устройств. При этом он обладает обширной библиотекой электронных компонентов, а также даёт возможность создавать модели недостающих элементов [1].

В качестве примера была разработана модель для оценки и анализа высших гармоник в системообразующей части электроэнергетических системы Республики Таджикистан [2].

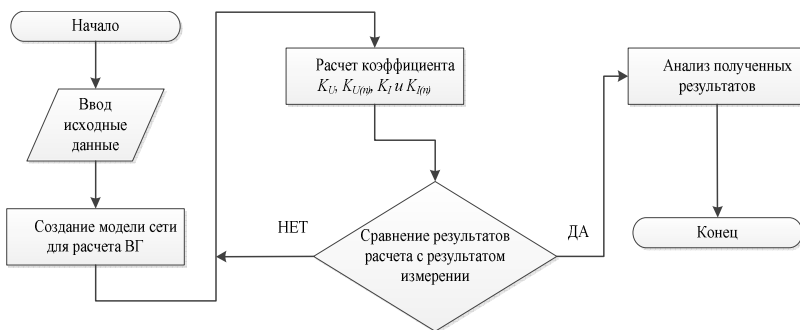


Рис. 1. Алгоритм моделирование КЭ в среде Matlab/Simulink

Для оценки погрешности результатов моделирование высших гармоник тока и напряжений был приведен инструментальный контроль в электрических сетях Республики Таджикистан [2]. Измерительные приборы были установлены в нескольких узлах системы.

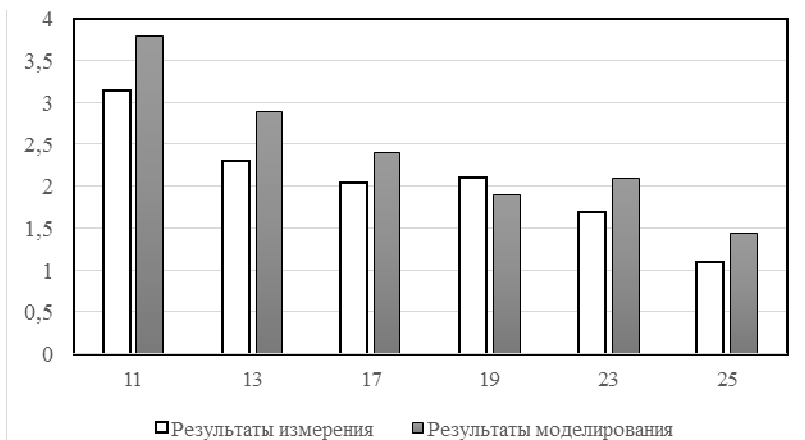


Рис. 2. Сравнение результатов моделирование с показанием измерительных приборов по результату измерения

Сравнение результатов моделирование утверждает подобие модели к реальному объекту и поведение адекватности моделей для оценки генераций распространение и потребление токов и напряжение высших гармоник (рис. 2).

Библиографический список

1. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower-Systems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 288 с.
2. **Тульский В.Н., Джураев Ш.Д.** Оценка качества электроэнергии в энергосистеме Республики Таджикистан / Энергия-2016: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. –Т. 3. – Иваново: ИГЭУ, 2016.

*Г.В. Квашина, асс.
(ЛГТУ, г. Липецк);
рук. Е.А. Чащин, к.т.н., доц.
(КГТА им. В.А. Дегтярева, г. Ковров)*

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ АНАЛИЗА НАРАБОТОК НА ОТКАЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Надежность электроснабжения потребителей является одной из первостепенных задач для промышленных и гражданских объектов. Большая часть элементов систем электроснабжения, в особенности элементов силового типа, относятся к восстанавливаемым после отказа элементам, а

сами системы подвергаются резервированию [1, 2]. Поэтому при оценке надежности для систем электроснабжения обычно используют параметр потока отказов и среднее время восстановления (аварийных и преднамеренных отключений). Однако математическое моделирование, основанное на анализе частоты возникновения отказов парциальных элементов, входящих в систему электроснабжения, затруднено. Другим способом оценки надежности в условиях работы с внешними, носящими стохастический характер, воздействиями является анализ, основанный на оценке длительности наработки элементов. Сравним эти способы оценки систем.

Статистический метод анализа использует средние статистические данные значения годовой продолжительности отключений элементов сети (времени восстановления) и частоты отказов оборудования. Согласно [3] суммарная средняя частота отказов оборудования равна

$$\bar{\lambda}_{\Sigma 1} = \sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i,$$

где λ_i – частота отказа i -го элемента цепи.

Затем через частоту отказов и длительность времени восстановления $\bar{\theta}$ вычисляется вероятность отказа каждого элемента:

$$\bar{p}_i = \bar{\theta}_i \cdot \bar{\lambda}_i.$$

Зная величину вероятности отказа отдельных элементов, находим суммарную вероятность отказа

$$\bar{p}_{\Sigma 1} = \Sigma \bar{p}_i.$$

Отсюда можно определить вероятность безотказной работы:

$$p_{\Sigma 1} = 1 - \bar{p}_{\Sigma 1}.$$

Однако для восстанавливаемых систем она характеризует только надежность до первого отказа. Длительность наработки при заданных параметрах вероятности работы и суммарной интенсивности отказов находится из выражения

$$\bar{\tau}_1 = \frac{p_{\Sigma}}{\bar{\lambda}_{\Sigma}}.$$

При проведении анализа с учетом закона распределения наработки на отказ считают, что для электрооборудования с высоким уровнем обслуживания и организации производства функция вероятности работы системы изменяется по экспоненциальному закону:

$$p_{\Sigma 2}(\tau) = e^{-\bar{\lambda}_{\Sigma} \tau},$$

а длительность наработки составляет

$$\bar{\tau}_2 = \int_0^{\infty} p_{\Sigma 2}(\tau) d\tau.$$

Расчет показал, что анализ цепи через вероятность отказов оборудования и через длительность наработок на отказ дает аналогичные резуль-

таты. Однако второй способ позволяет рассчитывать суммарную наработку, исходя из требований конкретной схемы и потребителя.

Следует учитывать, что экспоненциальная модель надежности описывает работу не стареющих элементов. Приемлемой моделью, описывающей постепенные отказы, является нормальный закон:

$$p_{\text{норм}} = 1 - \frac{\exp\left(\frac{-(1 - m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right)}{\sigma_t\sqrt{2\pi}},$$

где m_t – математическое ожидание, σ_t – среднее квадратическое отклонение.

Проведя анализ на примере условной схемы электроснабжения, оценили процент изменения длительности наработки на отказ при учете износа оборудования относительно теоретических значений, полученных по экспоненциальному закону и без учета износа. Получили, что длительность наработки при нормальном распределении снижается на 24 – 24,2 %.

Библиографический список

1. **Квашнина Г.В.** Оценка обеспечения безотказности электроснабжения потребителей при использовании в системе временной избыточности // Омский научный вестник. – 2014. – № 2 (130). – С. 165 – 168.
2. **Квашнина Г.В.** Алгоритм минимизации избыточных мощностей путем применения резервирования в системах электроснабжения // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии. XVIII Бенардосовские чтения: мат. междунар. науч.-техн. конф. – Т. I. Электроэнергетика. – Иваново, 2015. – С. 203 – 206.
3. **Матвеевский В.Р.** Надежность технических систем: учеб. пособие. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. – 113 с.

*А.Е. Ольховский, курсант, И.В. Колесник, асп.;
рук. Э.Н. Фоминич, д.т.н., проф.
(ВИ (ИТ) ВА МТО, г. Санкт-Петербург)*

УСТАНОВКИ ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ТИПА

Большинство ответственных потребителей специальных объектов МО для своей нормальной работы требуют не только высокой надежности и бесперебойности электроснабжения, но и высокого качества электроэнергии во всех режимах работы, другими словами гарантированного электроснабжения, гарантирующего высокую надежность, отсутствие перерывов в питании, высокое качество электроэнергии. Гарантированное электроснабжение ответственных потребителей не может быть обеспечено с помощью обычных энергетических средств и требует примене-

ния специальных установок, которые получили название установок гарантированного питания (УГП).

Основными требованиями к УГП являются:

непрерывность электроснабжения ответственных потребителей во всех режимах работы;

высокая надежность электроснабжения;

обеспечение высокого качества электроэнергии в нормальных и переходных режимах.

Несмотря на обилие различных конструктивных и схемных решений, сложились некоторые типовые схемы построения источников гарантированного питания. Наиболее перспективными являются УГП переменного тока статического типа с аккумуляторными источниками энергии, выполненные по схеме on-line с двойным преобразованием электроэнергии, которые обеспечивают на питаемых потребителях электроэнергию бесперебойное высококачественное синусоидальное напряжение.

По данной схеме аккумуляторная батарея постоянно подключена к входу выпрямителя и инвертора и питает последний при аварийном режиме. Диапазон мощностей для данного типа УГП лежит в области 10...100 кВт.

Данная схема построения установки гарантированного питания позволяет обеспечить практически идеальное питание нагрузки при любых неполадках в сети (включая фильтрацию высоковольтных импульсных и электромагнитных помех) и характеризуется нулевым временем переключения в аварийный режим без возникновения переходных процессов на выходе устройства. При этом источник гарантированного питания использует энергию аккумуляторных батарей и выполняет следующие функции:

- поглощение сравнительно малых и кратковременных выбросов напряжения;

- фильтрация питающего напряжения, снижение уровня шумов;

- обеспечение резервного электропитания нагрузки в течение некоторого времени после попадания напряжения сети;

- защита от перегрузок и короткого замыкания.

В соответствии с Государственным оборонным заказом на ОКР «Гарант» по техническому заданию МО РФ разработана установка гарантированного питания статического типа в сейсмостойком исполнении (УГП СТ СИ) для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей первой категории.

В соответствии с техническими условиями промышленность приступила к выпуску установок гарантированного питания статического типа в специальном исполнении «УГП СТ СИ» на мощности 10, 20, 50 и

100 кВт для применения в системах автономного электроснабжения с повышенными требованиями по надежности электроснабжения и качеству вырабатываемой электроэнергии.

В докладе подробно рассмотрены принцип действия и электрическая схема установки УГП СТ СИ. Особенностью данной установки гарантированного питания является двойное преобразование энергии для обеспечения более высокого качества выдаваемой энергии. Питающее переменное напряжение на первом этапе преобразуется в постоянное с амплитудой 200 В. На втором этапе осуществляется увеличение зарядного напряжения до 400 В. Это необходимо для обеспечения отсутствия провала в случае обратного преобразования постоянного напряжения в переменное в момент провалов или пропадания питающего напряжения.

Конструктивно УГП СТ СИ выполняется в виде шкафов и состоит из четырех основных частей: блока защиты; блока выпрямления и коммутации; блока преобразователей, блока измерений и индикации.

Библиографический список

1. **Ольховский А.Е.** Установки гарантированного питания статического типа в специальном исполнении // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: мат. Науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 277 – 282.

*Р.И. Сафин, студ., Е.М. Степанова, ст. преп.;
рук. Л.В. Доломанюк, к.п.н., доц.,
(КГЭУ, г. Казань)*

ВНЕДРЕНИЕ УСТРОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНИЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (FACTS) В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ ПС110/6

В ЕЭС на сегодня идет масштабное обновление сетей и электроэнергетических узлов. Реконструкция системы обоснована необходимостью обеспечения перспективных нагрузок в связи с предельной загрузкой существующих подстанций 110/6 кВ и развития прилегающих районов. В обновляемом ПС не просто меняется аппаратура, но и проходит глубокая модернизация всей системы узла. Выполняются задачи обеспечения устойчивой работы энергосистемы при различных возмущениях.

Задачи проектирования:

а) внедрение устройства и технологии управления линиями переменного тока (FACTS), с целью повышения пропускной способности линий и устойчивой работы энергосистемы при различных возмущениях;

b) повышение надёжности работы силового оборудования путём замены на более современное;

c) повышение надёжности работы релейной защиты и автоматики путем замены электромеханических устройств на микропроцессорные комплексы;

d) снижение эксплуатационных затрат.

Технология FACTS обеспечивает новый более совершенный уровень функционирования электроэнергетических систем. Она основана на использовании достижений современной силовой электроники и электромашино-вентильных комплексов. Применение этой технологии в энергосистемах России как никогда актуально.

Внедрение системы FACTS в ПС 110/6 решает такие актуальные проблемы как недостаточная пропускная способность межсистемных ЛЭП, слабая управляемость сети, недостаточная степень устойчивости ОЭС, неоптимальное распределение потоков мощности по параллельным линиям, рост потерь в сетях.

В проекте моделируется внедрение устройства и технологии управления линиями переменного тока (FACTS). Сравниваются показатели системы до внедрения FACTS и после внедрения. По полученным данным исследования проводится анализ.

Библиографический список

1. **Басс Э.И.** Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 295 с.

2. **Лыкин А.В.** Электрические системы и сети: учеб. пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.

3. **Правила** устройства электроустановок / Министерство энергетики РФ. 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 368 с.

4. **Федоров А.А.,** Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

Д.Ю. Сухарев

*(АО «Выксунский металлургический завод»,
г. Выкса, Нижегородской обл.)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШКАФОВ КРУ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АО «ВМЗ»

В эксплуатации АО «ВМЗ» находится большое количество шкафов КРУ 6 – 10 кВ различных конструкций и производителей. В настоящее

время их более 10 видов, наиболее многочисленные из которых: КРУ-2, КСО-202, КУ 10С, КУ 10Ц, КМП-С, КМ-1, К-63 и NXPLUS С.

Количество плановых и аварийных переключений в сетях 6 – 10 кВ превышает 95 % всех переключений, производимых в высоковольтных электроустановках предприятия. Анализ ликвидации сбойных ситуаций в сетях электроснабжения показывает, что для шкафов разных типов время и надежность при выполнении базовых операций различны. Поэтому время ликвидации сбойных ситуаций напрямую связано с эксплуатационными качествами применяемых шкафов КРУ.

Задачей данного исследования был сравнительный анализ эксплуатационных качеств и технико-экономических показателей шкафов КРУ 6 – 10 кВ, находящихся в эксплуатации АО «ВМЗ», а также выявление наиболее удачной конструкции. Методом исследования стал анализ зарегистрированных в оперативных журналах сбойных ситуаций и отказов оборудования, анализ данных журналов производства работ подстанций, анкетирование наиболее опытных работников, занимающихся ремонтом и эксплуатацией этих шкафов, в том числе работников других организаций, и систематизация полученных данных.

Результат исследования – получение рейтинга эксплуатационных качеств шкафов, определенный по комплексной оценке эргономики и надежности выполнения базовых операций, выполняемых оперативным персоналом на рассматриваемых шкафах, с одновременным сравнением рыночной стоимости этих шкафов. Из составленного рейтинга следует, что эксплуатационные качества, шкафов КРУ, применяемых на АО «ВМЗ» различны и не имеют прямой зависимости с их стоимостью.

Высокие эксплуатационные свойства и надежность применяемых шкафов КРУ – это надежное электроснабжение 6 – 10 кВ технологического оборудования промышленного предприятия, своевременная и безопасная ликвидация аварий и сбойных ситуаций. К сожалению, при строительстве новых распределительных устройств и подстанций, часто применяются шкафы с низкими эксплуатационными качествами и ненадежными узлами, значительно усложняющих их эксплуатацию, что неизбежно приводит к перерывам электроснабжения технологического оборудования, простоям и экономическим ущербам.

Полученные в результате исследования данные могут быть полезны при выборе шкафов КРУ, при проектировании будущих объектов электроэнергетики промышленных предприятий. Так как, позволят при этом, опираться на опыт эксплуатации оборудования, а не только на его технические характеристики, и делать выбор в пользу установки шкафов КРУ с высокими эксплуатационными качествами, что не всегда будет являться наиболее дорогостоящим решением.

М.В. Петровский, асп.;
рук. В.И. Доманов, к.т.н., доц.
(УлГТУ, г. Ульяновск)

АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНОЙ СПЕЦИФИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ УЧРЕЖДЕНИЙ

Для сравнения потребления электрической энергии мною будут рассмотрены: фирма, занимающаяся переработкой твердых бытовых отходов, и управление ЖКХ администрации города Ульяновска [1].

Фирма по переработке твердых бытовых отходов занимается прессовкой бумага, картона и переработкой пластика. В собственности фирмы находится три пресса мощностью 5, 7,5 и 2 кВт. Рабочий день начинается в 8.30 ч и заканчивается в 18.15 ч.

Управление ЖКХ администрации города Ульяновска занимается организацией и контролем работы в сфере жилищно-коммунального хозяйства города. В собственности организации находится около 30 компьютеров и другая оргтехника. Рабочий день начинается в 8.00 ч и заканчивается в 18.00 ч.

Сравним статистические показатели по обоим учреждениям (табл. 1).

Таблица 1. Статистические показатели учреждений

Наименование учреждения	Площадь занимаемого помещения (S), м ²	Месячное потребление электроэнергии (P ₃), кВт
Фирма по переработке ТБО	220	300
Управление ЖКХ	2114,57	3904

На основании приведенных данных сложно понять какая из организаций потребляет электроэнергии больше, для этого необходимо рассчитать сколько кВт электроэнергии приходится в учреждении на площадь помещения м². Обозначим данный коэффициент как Э_м. Рассчитаем введенный коэффициент по формуле:

$$\mathcal{E}_m = P_3 / S. \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_m \text{ (Фирма по переработке ТБО)} = 1,36 \text{ кВт/м}^2.$$

$$\mathcal{E}_m \text{ (Управление ЖКХ)} = 1,85 \text{ кВт/м}^2.$$

Видно, что потребление электроэнергии на м² в Управлении ЖКХ больше, что во многом обуславливается постоянной работой компьютеров и другой оргтехники в отличии от станков по прессовке бумаги (которые работают периодически) [2].

Библиографический список

1. **Аракелов В.Е.** Кремер А.И. Методические вопросы экономии энергоресурсов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

2. **Башмаков И.А.** Региональная политика повышения энергетической эффективности: от проблем к решениям. – М.: Центр энергет. эф-ти, 1996.

*М.Р. Саитгареев, маг.,
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 В РЭС 0,4 – 10 кВ

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, ПРН 6-10.

Проблема определения эффекта от применения трансформаторов с СО заключается в том, что завод изготовитель не приводит для них необходимых параметров, обеспечивающих выполнение расчетов уровня фазных напряжений при подключении несимметричной нагрузки. Также в существующих программных продуктах, таких, например, как Simulink, отсутствуют готовые математические модели рассматриваемых трансформаторов. В результате невозможно достоверно оценить преимущества от замены обычных трансформаторов на трансформаторы с СО, когда возникает задача технико-экономического обоснования реконструкции подстанции с целью улучшения показателей качества электроэнергии снижения потерь электроэнергии.

АТС-С эффективно устанавливать непосредственно у потребителя. На рис. 1 представлена схема АТС-С.

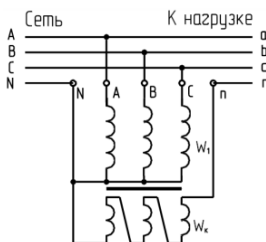


Рис. 1. АТС-С с компенсационной обмоткой, выполненной на каждой фазе

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

Для трансформаторов типа ТМГСУ авторами была разработана методика определения параметров схемы замещения с разными схемами соединения обмоток, так как стандартных параметров трансформаторов, полученных из опытов хх и кз, недостаточно для расчета параметров схемы замещения. Поэтому в работе было предложено дополнительно использовать внешние характеристики, снятые для неполнофазных режимов работы [2]. Схема замещения представлена на рис. 2.

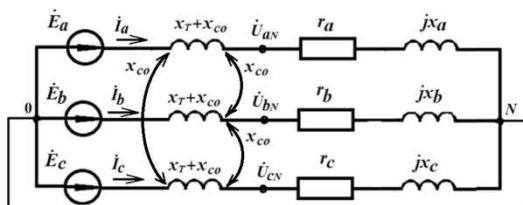


Рис. 2. Схема замещения, приведенная к его вторичной стороне

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 ближе к нагруженной фазе к аппроксимированным значениям, построенным по данным завода изготовителя, и в дальнейшем для оценки технической и экономической эффективности применения 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. Федотов А.И. Определение параметров симметрирующих трансформаторов / А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин, Н.В. Чернова // Промышленная энергетика. – 2015. – № 1.

Н.А. Шамарова, маг.;
рук. Д.С. Крупнев, к.т.н., доц.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)

ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ВЕТРЯНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Применительно к системам электроснабжения (СЭС) одной из основных функций является бесперебойное снабжение потребителей электроэнергией в необходимом количестве и установленного качества. Надежность является сложным комплексным свойством и в зависимости от назначения объекта и условий функционирования может включать ряд единичных свойств (отдельно или в сочетании), основными из которых являются: сохраняемость, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, режимная управляемость, устойчивость и живучесть [1].

Как правило, при проектировании систем электроснабжения, проведении обоснования эффективности и мест размещения электроэнергетических установок на возобновляемых энергоресурсах проводится без количественной оценки их надежности. Такое положение приводит к тому, что в ряде случаев принимаются неоптимальные, с точки зрения экономичности и надежности, решения [2]. Поэтому актуальной остается задача разработки и совершенствования методик оценки надежности систем электроснабжения, включающих возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

На сегодняшний день наиболее явно прослеживаются тенденции роста количества энергоисточников на базе ВИЭ, объемы ввода которых в ряде развитых стран опережают объемы ввода традиционной генерации [3].

Прежде всего, особенностью возобновляемых источников энергии является нестабильность выходной мощности, связанная с непостоянством характеристик энергоносителя (ветра, солнца). Поэтому в энергосистемах с ВИЭ присутствуют риски электроснабжения потребителей, связанные с непостоянством энергоносителя. Последствия от данных рисков заключаются в высокой вероятности нарушения электроснабжения потребителей. Зависимость выработки электроэнергии ВИЭ от случайного характера изменения погодных условий может привести к дополнительным затратам, остановке технологического процесса; потере информации; финансовому ущербу.

Предлагается для снижения ущерба и повышения качества функционирования систем с ВИЭ, целесообразно использовать анализ видов и последствий отказов ФМЕСА [4], который возможно проводить не только на этапе проектирования электроэнергетических систем с ВИЭ, но и в процессе её работы. Метод, основанный на ФМЕА и дополняющий его анализом экономических аспектов и вопросов безопасности в целях принятия решений по техническому обслуживанию.

Цель анализа состоит в качественном определении относительной величины каждого последствия отказа. Значения этой величины используются для установления приоритетности действий по устранению отказов или снижению их последствий на основе комбинаций критичности отказов и тяжести их последствий. анализа риска [Probabilistic Risk Analysis (PRA)].

Таким образом, с помощью данного метода возможна вероятностная оценка недоотпуска электроэнергии, связанного с риском непостоянства энергоносителей.

Библиографический список

1. **Математическая** модель и топологический метод расчета надежности распределительной электрической сети / Шушпанов И.Н., Суслов К.В., Воропай Н.И. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 6 (65). – С. 137 – 141.
2. **Информационные** технологии в интеллектуальных электрических сетях: монография / Солонина Н.Н., Степанов В.С., Суслов К.В. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014.
3. **Полуботко А.А.** Надежность и качество поставок электроэнергии категории эффективности логистической системы // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 321. – С. 142 – 146.
4. **ГОСТ Р 51901.12-2007.** Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.

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

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ЛИНИИ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С УЧЕТОМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Выбор сечения проводников линии наружного освещения производится по следующим условиям: 1) по допустимому значению потери напряжения осветительной линии, которое для наиболее удалённого светильника не должно превышать 5 % от номинального напряжения сети, для наименее удалённого – 2,5 %; 2) по допустимому нагреву [1]. На практике при выборе сечения проводников осветительной линии обычно пользуются рядом упрощений.

Произведены расчёты режима работы осветительной линии (без упрощений) только для первой (основной) гармоники, а также с учётом высших гармоник. Для обоих вариантов расчета принято, что напряжение в пункте питания имеет синусоидальный характер при отсутствии нагрузки (отходящие линии отключены) и действующее значение равно 230 В.

В качестве примера рассмотрена трехфазная осветительная линия с односторонним питанием. Пункт питания, к которому подключена данная осветительная линия, расположен непосредственно в ТП 10/0,4 кВ. 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 пункта питания до ближайшей опоры равна 80 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. Газоразрядные лампы высокого давления обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой. 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].

Значения токов высших нечетных гармоник (от 3-й до 39-й) для светильников с лампами ДНаТ при наличии компенсации реактивной мощности в процентах (относительно тока основной гармоники) представлены в [3]. На основе этих данных осуществлен расчет режимов осветительной линии с учетом высших нечетных гармоник. Результаты расчетов представлены на рис. 1, 2.

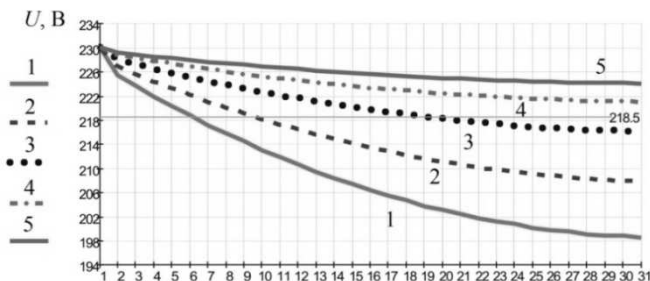


Рис. 1. Графики распределения напряжений в точках осветительной линии для фазы С – построенные при различных сечениях алюминиевых жил без учета высших гармоник

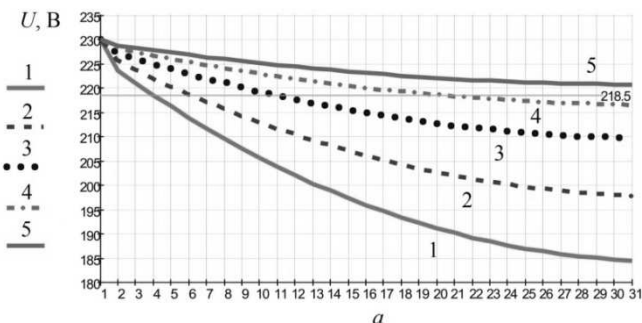


Рис. 2. Графики распределения напряжений в точках осветительной линии для фазы С – построенные при различных сечениях алюминиевых жил с учетом высших гармоник; где a – точка сети; 1 – распределение напряжения при сечении жилы кабеля $S = 4 \text{ мм}^2$; 2 – при $S = 6 \text{ мм}^2$; 3 – при $S = 10 \text{ мм}^2$; 4 – при $S = 16 \text{ мм}^2$; 5 – при $S = 25 \text{ мм}^2$

Можно сделать вывод, что протекание токов высших нечетных гармоник приводит к искажению синусоидальности напряжения, а также к повышению потерь напряжения, что требует применения в сети наружного освещения кабелей с большими сечениями жил для обеспечения бесперебойной работы источников света. Ток в нулевом рабочем проводнике сопоставим с током в фазных проводниках при учете высших гармоник.

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. – 972 с.
3. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

А.С. Смирнова, студ.;
рук. М.И. Соколов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ТРИГЕНЕРАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Тепловую энергию нельзя передавать на большие расстояния из-за резкого возрастания потерь с увеличением расстояния. Большинство энергостанций слишком далеко расположены, чтобы использовать их побочное тепло для обогрева общественных и жилых зданий. Поэтому появилась новая тенденция к развитию локальной энергетики и, как следствие, широкое применение когенерации как наиболее экономически эффективной и экологичной отрасли топливно-энергетического комплекса. Когенерация – процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии [1].

Ещё более перспективным является такой вид когенерации как тригенерация. Тригенерация – комбинированное производство электрической, тепловой энергии и полезного холода. Тригенерация подходит для всех объектов, которые имеют централизованную схему отопления, вентиляции и кондиционирования: аэропорты, банки, фермерские хозяйства, бизнес-центры, учебные заведения, центры обработки данных, предприятия – производители продуктов питания, государственные учреждения, больницы, базы хранения продовольствия, торговые центры, гостиницы. Холод вырабатывается холодильной машиной, потребляющей тепловую энергию, а не электрическую. Обычно используются абсорбционные бромисто-литиевые холодильные установки.

Абсорбционные холодильные установки экономичны и экологически безвредны. Они просты, надежны и не имеют насоса. Лучшие тригенераторы имеют очень высокую общую термическую эффективность – до 86 %, часть из которой (до 40 %) – приходится на электрическую энергию. Технологически схема тригенерации представляет собой соединение когенерационной установки с абсорбционной холодильной машиной (АБХМ).

Абсорбционная холодильная машина функционирует, исходя из определенных свойств хладагента и абсорбента, которые обеспечивают отвод тепла, охлаждение и поддержание необходимого температурного режима.

В системах тригенерации на базе АБХМ практически нет выбросов парниковых газов, отсутствуют вредные химические загрязнения, т.к. в качестве хладагента используется вода [2].

Главным преимуществом тригенерационной системы является производство того же количества энергоресурсов за счет значительно меньшего количества топлива, чем в случае раздельного производства электроэнергии и тепла. Имеются и другие плюсы данной технологии: максимальная приближенность к потребителю; возможность применения для любого потребителя как в качестве основного, так и резервного источника энергии; установка в любом месте; надежность в работе; быстрая окупаемость и долгий срок службы основного оборудования (до 25 лет до полного списания).

Однако есть и проблемы: в холодоснабжении перепад температур весьма невысок, что вызывает увеличение скорости холодной воды по отношению к отопительной, в результате чего появляется недопустимый шумовой эффект. Внутридомовые системы отопления не имеют тепловой изоляции и при транспорте холодной воды по ним неизбежна конденсация. Для решения этих проблем требуется перекладка трубопроводов и замена нагревательных приборов, что приведет к дополнительному удорожанию системы.

Все вышеуказанное исключает возможность организации централизованного холодоснабжения в существующих жилых зданиях без повсеместной перекладки трубопроводов и замены нагревательных приборов на нагревательно-охлаждающие вентиляторные конвекторы (fancoil) с отводом конденсата.

Политический заказ на усреднение тарифов для всех видов энергии, а также поверхностные знания сути производства комбинированной энергии на ТЭЦ привели к тому, что до настоящего времени в России нет экономических условий для широкого применения подобных систем, которые включают в себя единый технологический цикл системы тепло-снабжения и хладоснабжения. Системы тригенерации популярны в США и странах западной и центральной Европы. Это обусловлено стремительным ростом цен, а также спросом на энергоносители.

В Москве системами тригенерации оборудованы Корпоративный университет Сбербанка и недавно построенный стадион «Спартак». Есть и региональные примеры. Так, определенный интерес вызывает тригенерационный энергоцентр крупного торгового центра в Перми, возводимого группой компаний «Кармента» [3].

Библиографический список

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Когенерация>.
2. <http://www.powercity.ru/catalog/trigeneratsiya>.
3. http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3093.

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

СРАВНЕНИЕ СТАНДАРТОВ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время в России действует ряд стандартов на качество электроэнергии (КЭ) [1 – 4]. Эти стандарты устанавливают требования к показателям КЭ, к методам их измерений и содержат основные положения по организации, проведению контроля и мониторинга КЭ.

Основой для национальной стандартизации служат публикации Международной электротехнической комиссии (МЭК; International Electrotechnical Commission, IEC) и стандарты Института инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE).

Целью работы является анализ зарубежных и отечественных стандартов на КЭ для сопоставления требований к КЭ и отдельных показателей КЭ.

Проведены расчеты показателей КЭ по результатам проведенных измерений на одном из объектов ПАО НК «Роснефть».

По стандарту MG 1-1993 Национальной ассоциации производителей электрооборудования (NEMA) рассчитан небаланс напряжения, характеризующий несимметрию по обратной последовательности:

$$Unbalance_{\%} = \frac{\Delta U_{CP}^{MAX}}{U_{CP}} \cdot 100\%,$$

где ΔU_{CP}^{MAX} – максимальное отклонение напряжения от среднего; U_{CP} – среднее значение междуфазных напряжений [5].

Аналогом небаланса напряжения в стандартах серии МЭК (в том числе ГОСТ 32144-2013) является коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, который рассчитан по выражению:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \%,$$

где U_1 , U_2 – действующие значения напряжений прямой и обратной последовательности.

Проведено сопоставление таких показателей КЭ, как абсолютное отклонение напряжения (AVD), суммарный коэффициент гармонических искажений THD (total harmonic distortion) для четных и нечетных гармоник, и ИHD (individual harmonic distortion), который рассчитан для каждой гармоники в отдельности (совпадает с коэффициентом $K_{U(n)}$).

Кроме вышеприведенных показателей КЭ рассчитаны показатели: К-фактор и универсальный индекс КЭ – UPQI (Unified power quality index).

К-фактор учитывает влияние гармонических токов нагрузки на дополнительный нагрев трансформатора и рассчитан по выражению

$$K_{factor} = \frac{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h \max} I_h^2},$$

где h – порядковый номер гармоники, I_h – значение тока h -й гармоники [6].

Сравнение стандартов показало, что более жесткие требования к КЭ национального стандарта.

Библиографический список

1. **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. **ГОСТ 33073-2014.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. **ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008)** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
4. **ГОСТ 30804.4.7-2013.** Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.
5. **Assessment of Voltage Unbalance.** Annette von Jouanne. – IEEE Transactions on power delivery. – Vol. 16. – No. 4. – October 2001. – P. 782 – 790.
6. **Power quality indices in liberalized markets / P. Caramia, G. Carpinelli, P. Verde.** – Great Britain.: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.

*В.А. Гудков, К.А. Тихомирова, К.Д. Молчагина, студенты;
рук. О.А. Бушуева, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РАЙОНА НАГРУЗОК С ИСТОЧНИКОМ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Для многих регионов России, в которых наблюдается рост электропотребления, а резерв мощности отсутствует, существует проблема энергодефицита.

Решить проблему можно с помощью строительства новой электрической станции, но это долгосрочный и дорогостоящий способ. Альтернативой этому является применение объектов малой генерации, которыми являются мини ТЭЦ [1].

Объектом исследования является новый микрорайон одного из городов, в котором расположены жилые дома повышенной этажности, торговые центры и различные общественные здания. Электрическая нагрузка микрорайона составляет 15 МВт.

Источниками питания района является существующая подстанция энергосистемы и новая мини ТЭЦ с установленной мощностью 10500 кВт и генераторами типа NU 824E фирмы Cummins (Великобритания).

Целью работы является анализ режимов работы мини ТЭЦ и режимных параметров электрической сети для выполнения задания энергосистемы на технологическое присоединение мини ТЭЦ к существующей сети 10 кВ.

Расчеты режимов выполнялись с использованием программного комплекса «ENERGY UR» [2].

Рассчитаны режимы:

- параллельная работа мини ТЭЦ с энергосистемой при максимальной нагрузке района;
- параллельная работа мини ТЭЦ с энергосистемой при максимальной нагрузке района и выводе одного генератора в ремонт;
- автономная работа мини ТЭЦ при наименьшей нагрузке района.

Библиографический список

1. **Онлайн** платформа Академия «Распределенная генерация». Направления развития // Энергоэксперт. – 2016. – № 3.
2. **Кулешов А.И.**, Прахин Б.Я. Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: учебное пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»: Иваново, 2005. – 171 с.

*А.О. Любимова, студ.;
рук. М.И. Соколов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново),
М.Е. Осипов, зам. директора по гор. освещению
(АО «Ивгорэлектросеть», г. Иваново)*

ИЗМЕРЕНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Создание совершенной нормативно-правовой базы энергосбережения является одним из главных механизмов повышения энергоэффективности. Существующая нормативно-правовая база в области энергоэффективности и энергосбережения на федеральном и региональном уровне несовершенна. Зачастую она не способствует устранению таких барьеров, как недостаток информации, непонимание необходимости экономии ресурсов, ограниченный доступ к долгосрочным финансовым ресурсам, и не мотивирует предприятия реализовывать существующий потенциал энергосбережения. Единственным значимым стимулом к энергосбережению являются относительно высокие тарифы на энергоресурсы.

Массовому развитию энергоэффективных проектов в России долгое время мешало отсутствие стандартизированных методик расчета экономии энергоресурсов.

В настоящее время в России имеется несколько десятков государственных стандартов. Введен в действие Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» № 261-ФЗ от 23.11.2009 г., регламентирующий меры, препятствующие неэффективному расходованию энергии в различных отраслях народного хозяйства. Утвержден план мероприятий, направленных на реализацию данного закона.

Совсем недавно, приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Росстандарта от 20 ноября 2015 г. № 1929-ст утвержден ГОСТ Р 56743-2015 «Измерение и верификация энергетической эффективности» [1].

Стандарт учитывает успешный мировой опыт подобных методик, в первую очередь положения международного стандарта IPMVP, адаптированные к российским условиям.

Согласно ГОСТ, измерение и верификация – это процесс достоверного определения фактической экономии достигнутой в результате внедрения программы управления энергоиспользованием в рамках отдельного объекта путем проведения измерений.

Деятельность по измерениям и верификации энергетической эффективности включает в себя:

- обследование объекта;
- измерение расходования энергетических ресурсов;
- осуществление расчетов;

- формирование соответствующей отчетности.

Полученную в проекте экономию, как правило, очень сложно измерить, т.к. это расчетная величина, разница между объемом энергоресурсов, потребленных до и после внедрения мероприятий, скорректированная с учетом необходимых поправок на изменившиеся условия.

В Стандарте описываются общие рамки и четыре метода измерений и верификации (как для объекта в целом, так и по отдельным энергосберегающим мероприятиям); технология выбора того или иного метода; принципы и требования.

Применение стандарта помогает сторонам решить целый ряд задач: увидеть возможности увеличения экономии энергетических ресурсов; наладить прозрачную, надежную и единообразную отчетность о достижении запланированного размера экономии энергетических ресурсов; привлечь финансирование в проекты, повысить качество проектирования, эксплуатации и технического обслуживания объекта; запланировать затраты на энергетические ресурсы.

Несмотря на такое обилие существующих и разрабатываемых нормативных документов эффективность их применения на практике до сих пор низка. Это связано, с одной стороны, с отсутствием реально действующих организационных структур, координирующих работу объектов и субъектов правового регулирования в области энергосбережения, и осуществляющих непосредственный надзор (контроль) за выполнением принятых документов [2].

Технические регламенты и национальные стандарты должны стать важнейшим инструментом повышения конкурентоспособности отечественной экономики и ее инвестиционной привлекательности.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 56743-2015 Измерение и верификация энергетической эффективности. – М.: Стандартинформ, 2015.
2. Портал по энергосбережению «Энергосовет». Режим доступа: <http://www.energosovet.ru/>.

*А.В. Чистякова, И.В. Прокопьев, О.С. Щелкунова, студенты;
рук. А.Е. Аржанникова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ ПРАКТИКУМОМ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И СТРУКТУР СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Кафедра Электрических систем ИГЭУ с 2016 года преподаёт магистрантам I курса, обучающимся по направлению 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника (направленность «Электроснабжение»), дисциплину

лину «Спецвопросы оптимизации параметров и структур систем электроснабжения». Учебный план подготовки магистров предполагает проведение лекционных и практических занятий, причем доля практических составляет 60 % от аудиторных занятий.

Известно, что в памяти человека запечатлевается до 10 % того, что он слышит, до 50 % того, что он видит, и до 90 % того, что он делает. То есть, наряду с лекционными занятиями необходима методическая обеспеченность дисциплины, например, в виде учебного пособия, которое давало бы материал для всех видов занятий (теоретических, практических, лабораторных, самостоятельных).

В основу учебного пособия по дисциплине положена концепция поэтапного усвоения теоретического материала. Составляющие концепции: 1) постепенное усвоение теоретического материала, 2) активная познавательная деятельность студентов; 3) система упражнений, стимулирующих регулярное обращение к теоретическому материалу; 4) этапы освоения теоретического материала – ознакомление, детализация, обобщение. При этом: ознакомление с теоретическим материалом происходит на лекциях; детализация – расчеты вручную простых схем с двумя оптимизируемыми переменными – коллективно на практических занятиях; обобщение – машинные расчеты более сложных схем с элементами исследований – индивидуально на лабораторных занятиях (вычислительном практикуме).

Для сопровождения процесса обучения в учебном пособии по каждой теме обсуждаются общие (абстрактные) теоретические положения, приводятся алгоритмы методов, графические иллюстрации и условия окончания поиска, приведены постановка и примеры решения различными методами типовых оптимизационных задач в области электроснабжения, а в приложение помещены листинги решения тех же задач с использованием информационных технологий и задания для вычислительного практикума. Теоретический материал по теме изучается не одномоментно, а в течение минимум 3-х аудиторных занятий разных видов и во время самостоятельной подготовки. Обращение к учебному пособию происходит неоднократно в процессе изучения темы.

В рамках учебно-исследовательской работы магистрантами кафедры ЭС создается вычислительный (лабораторный) практикум по дисциплине, позволяющий студентам применять методы оптимизации к реальным схемам СЭС в среде MathCAD и Excel, имеющих в своем распоряжении необходимый инструментарий для построения математических моделей и решения оптимизационных задач.

В каждый из программных продуктов заложены свои методы расчета, процесс решения остается вне поля зрения, но работа с компьютером позволяет студенту проводить исследования на математической модели,

выявлять тенденции развития систем. Магистранты имеют достаточный опыт работы с предлагаемыми программными продуктами.

Дидактические принципы вычислительного практикума:

- связь практикума с курсом лекций (единство эксперимента и теории);
- интенсификация образовательного процесса за счет экономии времени на рутинных вычислениях;
- анализ, грамотная обработка и наглядное представление данных с использованием компьютерных технологий;
- профессиональная направленность практикума;
- исследовательская ориентация учебного процесса;
- использование современного оборудования;
- фронтальность в сочетании с организацией самостоятельных экспериментальных исследований.

Лабораторные работы построены следующим образом: обсуждение темы работы, просмотр презентации с примером решения оптимизационной задачи и выполнение индивидуального задания под контролем преподавателя. В процессе такого исследовательского занятия происходит расширение кругозора, обобщение, систематизация, углубление, закрепление полученных теоретических знаний по конкретным темам.

Авторами разработан комплекс дидактических средств – описана последовательность операций и разработаны примеры решения условных оптимизационных задач линейного и нелинейного программирования при детерминированной исходной информации. Заготовлены варианты исходных данных заданий для самостоятельной работы каждого студента.

Магистранты, участвующие в разработке учебного пособия, приобретают знания и умения согласно профессиональной компетенции, соответствующей педагогическому виду деятельности – способности к реализации различных видов учебной работы.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Одной из актуальных задач, стоящих перед эксплуатационными службами городских электрических сетей, является оценка фактической загрузки основных элементов городской электрической сети: силовых трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ, кабельных и воздушных линий электропередач напряжением 0,4 кВ и 6 – 10 кВ.

Для оценки загрузки силовых трансформаторов, кабельных и воздушных линий электропередач используется расчетная нагрузка. Под расчетной понимается такая длительная неизменная нагрузка элемента системы электроснабжения, которая эквивалентна ожидаемой (фактической) изменяющейся нагрузке по тепловому воздействию, т.е. расчетная нагрузка – это максимальная осредненная за определенный интервал времени нагрузка. Таким образом, расчетная нагрузка определяется в том числе и постоянной времени нагрева проводника T_0 , так как в подавляющем большинстве случаев интервал осреднения нагрузки τ принимается $3T_0$.

В соответствии с этим в зависимости от элемента электрической сети, для которого требуется выполнить оценку фактической загрузки, необходим выбор соответствующего интервала осреднения. В табл. 1 приведены ориентировочные значения постоянных времени нагрева для различных элементов городской электрической сети согласно [1, 2].

Таблица 1. Постоянные времени нагрева для различных элементов городской электрической сети

Наименование элемента	Параметры элемента	Постоянная времени нагрева, мин
Силовой трансформатор	Номинальная мощность до 6300 кВА включительно выше номинальное напряжение до 10 кВ включительно система охлаждения М, Д	150
Силовой кабель	Трехжильный бронированный с бумажной изоляцией на напряжение 1...10 кВ проложенный в земле с медными жилами сечением $4 \div 240 \text{ мм}^2$	$6 \div 45$

В качестве примера для оценки влияния интервала осреднения на расчетную нагрузку рассмотрен суточный график электропотребления на вводе 0,4 кВ городской трансформаторной подстанции 6/0,4 кВ, питающей частный сектор. Данный график представлен на рис. 1.

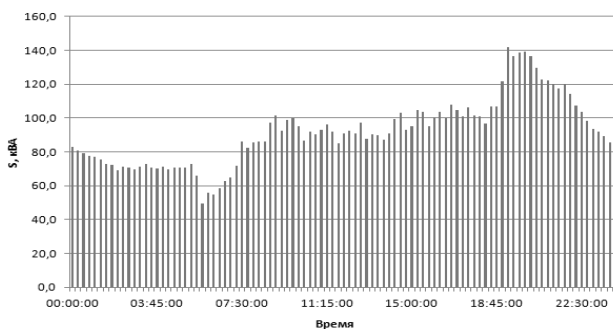


Рис. 1. Пример суточного графика изменения нагрузки трансформатора 6/0,4 кВ (15-минутный интервал измерений)

По результатам измерений с применением AR.5 максимальное значение потребляемой полной мощности (действующее значение) составило 155,0 кВА.

В табл. 2 приведен анализ изменения расчетной мощности в зависимости от интервала осреднения.

Таблица 2. Анализ изменения максимальной (расчетной) нагрузки на вводе 0,4 кВ силового трансформатора 6/0,4 кВ городской электрической сети, питающего частный сектор, в зависимости от интервала осреднения

Постоянная времени нагрева T_0 , мин	Интервал осреднения, $\tau = 3T_0$, мин	S, кВА	dS, %
5	15	141,7	-8,6
10	30	139,2	-10,2
60	180	124,7	-19,5
120	360	113,3	-26,9

По результатам проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. При оценке фактической загрузки элементов городской электрической сети необходимо использовать измерительные комплексы с возможностью записи параметров электропотребления в память с необходимой дискретностью.

2. Расчетные нагрузки по результатам фактических измерений должны определяться с учетом постоянной времени нагрева для рассматриваемого элемента электрической сети.

Библиографический список

1. **Кудрин Б.И.** Системы электроснабжения: учебное пособие для вузов / Б.И. Кудрин. – М.: Академия, 2011. – 352 с.
2. **ГОСТ 14209-85** Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М.: Стандартинформ, 2009.

Е.А. Максименко, студ.;
рук. Д.А. Полкошиников, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В УЛИЧНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Современные системы уличного освещения в городах и населенных пунктах являются достаточно энергоемкими инженерными системами. Поэтому мероприятия по энергосбережению в них приносят ощутимый экономический эффект. Важнейшим условием снижения электропотребления в осветительных установках является переход на использование

современных экономичных источников света и светильников. Внедрение светодиодного освещения – это одна из значительных составляющих экономии топливно-энергетических ресурсов. Одним из таких решений является замена традиционных ламп ДРЛ и ДНаТ для светильников уличного освещения на светодиодные лампы.

Светодиодные лампы могут быть установлены в уже существующие светильники городского уличного освещения, что значительно экономит средства городского бюджета при переходе на светодиодное освещение. Основное преимущество данного решения заключается в том, что замена обычных светильников на светодиодные светильники не требуется. Переход на энергоэффективное освещение улиц осуществляется заменой только ламп. Кроме того, для новых систем освещения предлагаются светодиодные светильники для уличного освещения на основе светодиодных ламп.

В качестве примера для сравнительного анализа была взята программа замены светильников и ламп, осуществляемая в настоящее время в Белгородской области.

Устанавливаемые вновь светодиодные лампы имеют ряд преимуществ перед используемыми лампами.

Лампы ДНаТ обладают самой высокой светоотдачей среди газоразрядных ламп и незначительным снижением светового потока при длительном сроке службы. Но для них свойственен эффект старения и невысокая температурная устойчивость. Светодиоды же сохраняют свои свойства практически в полной мере на протяжении всего срока службы. Их единственный минус в достаточно высокой цене.

В табл. 1 приведены технические характеристики газоразрядных ламп типа ДНаТ и светодиодных ламп типа LED E40.

Таблица 1. Сравнительные характеристики ламп ДНаТ и LED E40

Тип лампы	Номинальные значения			Средняя продолжительность горения, ч
	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	
ДНаТ	150	14500	96,7	10000
LED 40	100	10000	100	50000

Светодиоды имеют быстрое время включения < 0,5 сек. В отличие от светильников на основе люминесцентных ламп, ламп ДРЛ или ДНаТ (7 – 20 мин.), светодиодные возможно эксплуатировать в составе интеллектуальных систем управления освещением – датчиками максимальной или минимальной освещенности, присутствия людей, движения.

Светодиодные лампы не содержат вредных для здоровья человека веществ, а светильники не опасны для окружающей среды. В отличии, на-

пример, от люминесцентных (энергосберегающих) ламп, ламп ДРЛ, в которых, концентрации паров ртути (0,2 – 0,9 мг) достаточно для хронического отравления, при случайном повреждении колбы внутри замкнутого пространства (до 100 – 1500 м³). При этом также, отпадают расходы по обязательной утилизации ламп.

Рабочее напряжение у уличных светильников (фонарей) на основе светодиодов составляет от 165 В до 245 В. У всех прочих типов светильников возникает зависимость от напряжения в сети (проблемы с запуском, гашение, снижение срока службы). Работа же светодиодных светильников в уличных условиях остается стабильной при большом разбросе рабочих напряжений.

С учетом всех факторов, касающихся издержек эксплуатации ламп ДНаТ, светодиодные аналоги полностью окупают себя примерно за 3 года. В последующие года они начинают приносить прибыль, выдавая при этом самый качественный свет по сравнению с другими технологиями.

Библиографический список

1. **Новости** электроэнергетики [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/>.
2. **Загиров Д.Г.** Энергосбережение: учеб. пособие. – Пермь: Книга, 2000.

*В.А. Пеньков, В.И. Пирогова, Н.А. Румянцев, студенты;
рук. Д.А. Полкошников, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СПОСОБЫ СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ ОТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

Наша планета обладает ограниченными запасами невозобновляемых источников энергии. Кроме того, выброс вредных веществ при преобразовании ископаемых энергоносителей привел к мировому экологическому кризису, обостряющемуся с каждым годом. Поэтому сегодня становится актуальным использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Основным направлением применения электроэнергии, получаемой от возобновляемых источников, является освещение.

Процесс выработки электроэнергии и ее потребления в данном случае не совпадает по времени, так как энергия, получаемая от солнечных батарей, вырабатывается только в светлое время суток, а производство электроэнергии ветряными генераторами носит случайный характер. В связи с этим возникает задача сохранить полученную электрическую энергию до момента ее потребления.

Существуют традиционные методы хранения электроэнергии – аккумуляторные батареи и конденсаторы. Принцип действия аккумулятора основан на обратимости химической реакции. Работоспособность аккумулятора может быть восстановлена путём заряда, то есть пропусканием электрического тока в направлении, обратном направлению тока при разряде. Несколько аккумуляторов, объединённых в одну электрическую цепь, составляют аккумуляторную батарею. Конденсатор в свою очередь заряжается приложением напряжения на клеммы, что заставляет положительные и отрицательные заряды перемещаться к поверхности электрода противоположной полярности.

К новым направлениям хранения электроэнергии можно отнести:

- метановый накопитель,
- маховик,
- горячий аккумулятор.

Немецкие ученые разработали технологию, в которой излишки электроэнергии, выработанные солнечными или ветро-электростанциями и не нужные в данный момент, используются для электролитической диссоциации воды на кислород и водород. В дальнейшем полученный водород, соединяясь с подаваемым в систему углекислым газом, образует метан, который уже можно хранить и использовать для получения энергии в любое время. По оценкам ученых, эффективность подобного преобразования выше 60 %.

Еще одним способом является использование «супермаховиков». На стальном валу маховика (там же – внутри герметичного стального цилиндрического кожуха) расположен ротор обратной электрической машины – мотора-генератора на постоянных магнитах, который и раскручивает маховик, запасая энергию, или отдает ее, вырабатывая электрический ток, при подключении нагрузки. Современные супермаховики с намоткой из углеродного волокна имеют удельную энергоёмкость до 130 Вт·ч/кг. Это несколько уступает показателям лучших литий-ионных аккумуляторов, но у накопителей на маховиках есть и свои преимущества: они гораздо дешевле, долговечнее и безопаснее (не только для здоровья обслуживающего персонала, но и, что не менее важно, для окружающей среды).

Следующий способ – это использование горячих аккумуляторов. Он напоминает тугоплавкий «стакан» (корпус служит первым наружным контактом), накрытый крышкой (второй наружный контакт). Между ними – диэлектрик, а вокруг теплоизолирующая оболочка. На дне емкости находится сурьма (это первый внутренний электрод), следом сульфид натрия (электролит), а сверху магний (второй внутренний электрод). Все компоненты – в расплавленном виде. При заряде слой электролита в та-

ком аккумуляторе становится тоньше, а расплавленные электроды – толще. При разряде все происходит в обратном порядке: материал электродов (ионов) частично переходит в электролит, так что центральный жидкий слой растет, а боковые – электроды – сокращаются.

Такая система способна выдержать огромное число циклов зарядки и разрядки, многократно превышающее все, что могли продемонстрировать прежние батареи, а кроме того, может отдавать и принимать гигантские токи без каких-либо повреждений (в системе просто нечему выйти из строя). Кроме того, все компоненты такого аккумулятора оказались недорогими.

Библиографический список

1. <http://universe-tss.su/main/nauka/18803-problema-hraneniya-energii.html>.

*П.О. Мельникова, К.Д. Молчагина, студенты;
рук. Д.А. Полкошников, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ТИПЫ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Уровень напряжения в низковольтных сетях не всегда соответствует предъявляемым нормам. Особенно это относится к частному сектору, где низковольтные сети наиболее протяженные. Кроме того, именно в частном секторе встречаются потребители электроэнергии, усугубляющие качество электроэнергии, такие как сварочные аппараты, мощные электродвигатели и т.п.

Отклонение напряжения от номинального значения сказывается на всех электроприборах, но наибольшее влияние оказывает на микропроцессорную технику, которая при скачках напряжения может перегореть. И если выход из строя большинства бытовой техники не влечет за собой серьезных последствий, то перегорание платы газового котла, который является незаменимым оборудованием в частном доме, может стать серьезной проблемой, особенно в суровом Российском климате.

Чтобы защитить электрооборудование от скачков напряжения следует устанавливать стабилизаторы напряжения. Существует шесть типов стабилизаторов напряжения. Однако не все стабилизаторы можно устанавливать совместно с газовым оборудованием.

Электромеханические. К сожалению, этот вид стабилизаторов к газовым котлам не подключается. Все дело в том, что в конструкции прибора присутствует контактная группа. При соединении и разъединении кон-

тактов вспыхивает искра. Она может стать причиной большого пожара, если в какой-то системе произошла утечка газа.

Релейные. Это надежные приборы, которые спокойно выдерживают не только перепады напряжения, но и достаточно внушительные нагрузки. Основу релейного стабилизатора составляет силовой трансформатор и электронный блок. Электронный блок современного релейного стабилизатора напряжения представляет собой достаточно мощный микроконтроллер, в котором происходит анализ входного и выходного напряжения и вырабатываются сигналы для управления ключами или силовыми реле стабилизатора.

Импульсные, или как их еще называют, с вольтодобавкой. Стабильность выходного напряжения в стабилизаторах этого типа обеспечивается за счет использования принципа регулирования с помощью вольтодобавочного трансформатора. Формирование напряжения вольтодобавки осуществляется с помощью регулятора, состоящего из автотрансформатора и переключающего симисторного устройства.

Тиристорные (симисторные). Принцип работы основывается на автоматическом переключении секций (обмоток) автотрансформатора (или трансформатора) с помощью силовых ключей – тиристоров. Эти стабилизаторы имеют сходство с релейными стабилизаторами, но в отличие от них не имеют контактной группы, имеют намного больше ступеней стабилизации и большую точность от 2 до 5 %.

Феррорезонансные. В феррорезонансном колебательном контуре энергия магнитных потоков, с постоянной амплитудой циклически перетекает между обмотками трансформатора и дросселя, находящихся в резонансе.

Инверторные стабилизаторы. Наиболее дорогостоящий тип стабилизаторов напряжения. Принцип работы инверторных моделей заключается в преобразовании переменного тока в постоянный (на входе) и назад в переменный (на выходе) благодаря микроконтроллеру и кварцевому генератору. Безусловным плюсом инверторных СН с двойными преобразованием считается широкий диапазон входного напряжения (от 115 до 290 В), а также высокая скорость регулирования, бесшумность работы, компактные размеры и наличие дополнительных функций. СН инверторного типа могут дополнительно защищать бытовые приборы от перенапряжения, а также остальных помех внешней электрической сети.

Так как для микропроцессоров газового оборудования наиболее опасными являются положительные отклонения напряжения, то наиболее оптимальным решением является применение инверторных стабилизаторов напряжения, так как они имеют высокую скорость регулирования и возможность защиты от перенапряжений.

Библиографический список

1. **Бутов, А.** Стабилизатор напряжения на микросхеме AN6652 / А. Бутов; ред. и граф. Н. Нечаев // Радио. Б.м. – 2009. – № 7. – С. 51.

*Т.К. Желов, Е.О. Курилов, студенты;
рук. А.А. Шульпин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СЕТЯХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
С ВЕНТИЛЯТОРНЫМИ НАГРУЗКАМИ**

Значительная доля электрической энергии (ЭЭ) приходится на общепромышленные потребители (насосы, вентиляторы, компрессора и т.д.) с вентиляторными нагрузками. Стандартное управление таких потребителей, на примере насосов, заключается в регулировке дросселей, устанавливаемых в напорных линиях и определении числа действующих агрегатов. За счет этого удается получить определенные технические параметры, такие как давление в трубопроводе и другие.

Для питания насосов используются асинхронные двигатели общего назначения. Асинхронные двигатели насосов имеют постоянную частоту вращения и не учитывают изменяющийся расход воды в результате переменного водопотребления. Даже в случае минимального расхода воды насосы будут поддерживать постоянную частоту вращения, создавая избыточное давление в сети, что может привести к аварийным ситуациям. Все это сопровождается значительным нерациональным расходом ЭЭ.

С появлением частотно регулируемого привода (ЧРП) появилась возможность поддержки постоянного давления непосредственно у потребителей. Данные системы хорошо зарекомендовали себя в совокупности с асинхронными двигателями общего назначения. Регулировка частоты позволяет изменять скорость вращения вала, делая ее более высокой или низкой по сравнению с номинальной.

ЧРП обеспечивают: экономию ЭЭ от 20 до 60 % за счет оптимального управления асинхронным двигателем в зависимости от нагрузки, повышение надежности и увеличения срока службы электропривода и оборудования, снижение аварийности и улучшение технической эксплуатации оборудования.

Для оценки эффективности использования частотного регулирования насосов и других потребителей с вентиляторными нагрузками вместо дроссельного будет разработан испытательный стенд.

Библиографический список

1. **Браславский И.Я.**, Ишматов З.Ш, Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: ИЦ «Академия», 2004. – 256 с.

*А.И. Мухин, А.Н. Ивашина, студенты;
рук. А.А. Шульпин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УЧЕТА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ КАНАЛОВ СВЯЗИ**

Развитие техники вызывает увеличение потребления энергоресурсов, а с другой стороны увеличение их стоимости. В таких условиях весьма актуальным становится объективный учет потребленных ресурсов и принятие эффективных мер по предупреждению их несанкционированного отбора. Автоматизированная информационно измерительная система учета электроэнергии (АИИС УЭ) обеспечивает коммерческий и технический учет, оперативный контроль текущей нагрузки, коммерческий учет и оперативный контроль потребления энергоносителей, поддержку принятия решений при планировании энергопотребления и выработки энергосберегающей политики.

Успешную работу средств АИИС УЭ обеспечивают каналы связи. Отсутствие каналов связи или их плохое состояние может привести к сдерживанию и малоэффективному использованию АИИС УЭ, а также полному выводу системы из строя. Выбор каналов связи, а также выбор оборудования связи должен производиться на стадии проектирования АИИС УЭ с учетом требования обеспечения служебной и технологической связи с объектами.

Повышению эффективности внедрения и использования АИИС УЭ способствует использование двух каналов связи – проводного с PLC-интерфейсом и беспроводного с GSM-каналом. АИИС УЭ с использованием проводного PLC канала связи целесообразно применять в бытовом секторе (с большим и средним числом измерительных комплексов на единицу площади их расположения). АИИС УЭ с использованием беспроводного GSM канала связи целесообразно применять в электрических сетях напряжением выше 1000 В (с малым числом измерительных комплексов на единицу площади их расположения).

Для оценки эффективности использования проводного и беспроводного каналов связи АИИС УЭ разработаны испытательный стенд на базе счетчиков «Меркурий 221» и методика проведения испытаний.

*Р.С. Сотчева, Н.Е. Захаров, студенты;
рук. А.А. Шульгин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СТРУКТУРА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ЕЕ АНАЛИЗ

Потери электроэнергии (ЭЭ) – это важнейший показатель экономичности работы электрических сетей (ЭС), состояния системы учета электроэнергии, эффективности энергосбытовой деятельности энергоснабжающих организаций. По мнению экспертов, относительные потери ЭЭ при ее передаче и распределении в ЭС большинства стран можно считать удовлетворительными, если они не превышают 4 – 5 %. В реальности потери ЭЭ достигают 9 % [1].

Увеличению потерь ЭЭ в РФ способствует постепенный рост нагрузок при морально устаревшем и изношенном оборудовании, поэтому проблема снижения потерь ЭЭ в ЭС становится особенно актуальной.

В табл. 1 произведено структурирование видов потерь ЭЭ с пояснениями и выделением составляющих с наибольшим весом.

Таблица 1. Структура потерь электроэнергии в электрических сетях

Вид	Потери, обусловленные технологическими особенностями оборудования			Потери, обусловленные человеческим фактором (хищение)
Подвид	Технические потери ЭЭ	Расход ЭЭ на СН ПС	Потери ЭЭ из-за погрешностей ее измерения	Коммерческие потери ЭЭ
Соотношение	ЛЭП – 65 % Трансформаторы – 30 % Реакторы, СК, СТК, счетчики, ТТ и ТН – 3 % СН ПС – 2 %			Население – 51 % Общественный сектор – 27 % С/Х – 16 % Промышленность – 6 %

Результаты анализа данных, приведенных в табл. 1, показывают, что в категории технологических потерь ЭЭ наибольший вес имеют потери ЭЭ в ЛЭП и трансформаторах (95 %), а в категории коммерческих потерь ЭЭ – потери в секторе населения (51 %). Именно в этих категориях мероприятия по снижению потерь ЭЭ в ЭС являются наиболее эффективными.

Библиографический список

1. МРСК Центра: годовой отчет 2015 [электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.mrsk-1.ru>.

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

На сектор освещения приходится значительная доля общего энергопотребления, при этом потенциал энергосбережения за счет применения новых энергоэффективных технологий освещения составляет от 75 до 90 % по сравнению с традиционными технологиями.

Россия обладает одним из крупнейших в мире потенциалов энергосбережения в секторе освещения. В России около 15 % всей электроэнергии расходуется на освещение, что составляет порядка 140 млрд кВт·час в год – это около 10 % от установленной генерирующей мощности (фактически еще одно удвоение ВВП) [1].

Большой резерв экономии электроэнергии, расходуемой на освещение, заложен в максимальной рационализации управления и регулирования освещением. Своевременное включение и выключение освещения, согласование работы искусственного освещения с динамикой естественного освещения (с целью максимального использования последнего), а также обеспечение возможностей регулирования искусственного освещения позволяют получить значительную экономию электроэнергии.

Согласно [2], при автоматизации управления освещением и осветительными установками возможна экономия электроэнергии до 75 % по сравнению с нерегулируемым освещением (рис. 1).

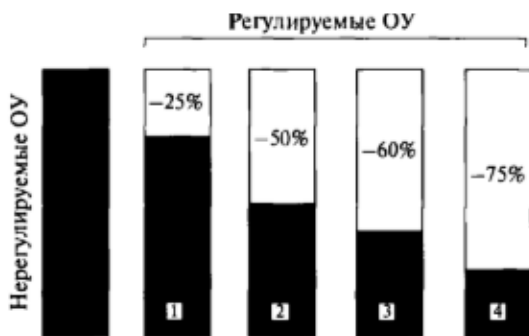


Рис. 1. Потенциал экономии электроэнергии в осветительных установках при различных вариантах управления: 1 – ручное управление; 2 – ручное управление + датчики присутствия; 3 – автоматическое регулирование светового потока ламп в зависимости от интенсивности естественного света; 4 – комбинация вариантов 2 + 3 + контроллер с часами реального времени

Использование систем управления осветительными установками позволяет решить следующие задачи:

- экономия электроэнергии;
- улучшение комфортности освещения и повышение безопасности;
- увеличение срока службы источников света;
- мониторинг и диагностика осветительных приборов.

Стоит обратить внимание, что при использовании систем управления осветительными установками в комплексе с применением осветительных приборов с диммируемыми (регулируемыми) электронными пускорегулирующими аппаратами достигается максимальный экономический эффект.

Выбор энергосберегающих мероприятий должен выполняться на основе технико-экономического обоснования, учитывая реальные режимы работы осветительных установок и их техническое состояние.

По результатам проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы:

1. Потенциал экономии электрической энергии в осветительных установках огромный и может достигать 90 %.

2. Большую роль в реализации указанного энергосберегающего потенциала имеет совершенствование систем управления осветительными установками.

3. Энергосберегающие мероприятия должны иметь соответствующее экономическое обоснование.

Библиографический список

1. **Формирование** светотехнического рынка России для повышения эффективности освещения / Циссис Ж., Айзенберг Ю.Б., Шевченко А.С. // Светотехника. – 2009. – № 9. – С. 42 – 48 с.
2. **Справочная** книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.

*Ю.А. Кузнецова, М.В. Иванова, студенты;
рук. А.Ф. Сорокин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Главное назначение дуговых печей – плавка металлов и сплавов. Наибольшее распространение получили дуговые печи (ДСП) прямого нагрева, используемые для плавки черных и тугоплавких металлов. В таких печах дуга горит между электродами и расплавленным металлом.

ДСП обычно работает в круглосуточном режиме с остановками на ремонт и профилактический осмотр. Технологический процесс включает в себя периодическое чередование плавки с отключением печи для слива металла, последующей заправки и загрузки компонентов. Значительная мощность печных агрегатов предусматривает большое потребление электрической энергии, следовательно, перед технологами промышленного предприятия стоят задачи выбора оптимального режима работы печи, обеспечивающего как высокую производительность печи, так и минимальный расход электроэнергии.

Так как оптимальные значения этих показателей часто не совпадают, обеспечение рациональных условий работы ДСП основывается на анализе энергетических характеристик. Электрические режимы работы ДСП определяются расчетными величинами токов, напряжений, сопротивлений и мощностей. Изменение длин дуг и их сопротивлений приводит к изменению напряжения, причем эти изменения колеблются от нуля (короткое замыкание) до максимума при обрыве дуги.

Более полную картину изменения энергетических показателей установки со сменой режима работы ДСП можно получить при расчете рабочих, тепловых и электрических характеристик, таких как: полная активная мощность установки; мощность дуги; электрические и тепловые потери; электрический КПД; коэффициент мощности; расход электроэнергии на плавку; производительность; время плавки.

Начальные теоретические расчеты параметров ДСП производят на основе их схем замещения. В расчетах электрические элементы цепи представлены активными и индуктивными сопротивлениями, подобранными такими, что при одинаковых напряжениях потребляемые токи и мощности схемы замещения и реальной цепи равны. В схемах замещения электрические дуги заменяются активными сопротивлениями.

Рабочие параметры ДСП определяют опытным путем при рабочей нагрузке печи, аналитическим расчетом с применением известных методик.

При расчете электрических и рабочих характеристик дуговой сталеплавильной печи значительно снижают точность расчета принимаемые допущения [1] о постоянстве напряжения на шинах питания ДСП $U_{\text{ДСП}} = \text{const}$, что, в свою очередь, предопределяет значение мощности короткого замыкания (КЗ) на шинах питания ДСП $S_{\text{КЗ ДСП}} = \infty$.

В реальном случае мощность КЗ на шинах питания ДСП $S_{\text{КЗ ДСП}}$ определяется значением исходного напряжения и ограничена сопротивлениями системы электроснабжения (СЭС). В то же время ДСП, являясь мощной электрической нагрузкой, в режиме работы приводит к снижению напряжения на шинах питания ДСП, что, следовательно, приводит к изменению электрических и рабочих характеристик ДСП, а также показа-

телей качества электроэнергии (ПКЭ): установившегося отклонения напряжения на шинах питания печного трансформатора ДСП – $\delta U_{y,дсп}$, установившегося отклонения напряжения на шинах питания ДСП от ГПП – $\delta U_{y,гпп}$ и колебания напряжения на шинах питания ГПП – $\delta U_{t,гпп}$.

В работе были рассмотрены два варианта расчета рабочих характеристик:

1. При $S_{кздсп} = \infty$;
2. С учетом сопротивления системы электроснабжения и заданным значением $S_{кздсп}$.

В результате расчетов получено, что при определении электрических и рабочих характеристик ДСП неучет изменения параметров питающей СЭС приводит к погрешностям. Таким образом, учет изменения параметров питающей СЭС в значительной степени повышает точность оценки электрических и рабочих характеристик ДСП, а так же позволяет определять ПКЭ в СЭС.

Библиографический список

1. **Электрические** промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: учеб. для вузов / А.Д. Свенчанский [и др.]; под ред. А.Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Болотов А.В.,** Шпель Г.А. Электротехнологические установки. – М.: Высш. шк., 1988. – 336 с.
3. **Электротехнологические** промышленные установки / Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.

СЕКЦИЯ 14

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

*В.А. Чичикин, студ., И.В. Колесник, адъюнкт,
С.С. Саенко, ст. преп.;*
рук. А.А. Тишков, к.т.н.
(ВИ(ИТ) ВА МТО, г. Санкт-Петербург)

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В системах электроснабжения с изолированной нейтралью надежность работы и безопасность эксплуатации электрооборудования во многом зависит от частоты возникновения и длительности существования однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), которые являются наиболее частым видом повреждения изоляции. ОЗЗ на практике бывает достаточно редко «металлическим», а как правило имеет некоторое переходное сопротивление. Данный режим чрезвычайно опасен, так как протекание даже малых токов в доли ампера в локализованных по объему дефектах изоляции может привести к возгоранию. Таким образом, проблема пожаробезопасности электрооборудования (ЭО), требует своего решения.

Контроль изоляции направлен на обеспечение надёжной работы и повышение пожаробезопасности СЭС, работающих в режиме с изолированной нейтралью. Его эффективность зависит от следующих составляющих: достоверности контроля эквивалентного сопротивления изоляции СЭС, оперативности определения места повреждения изоляции, правильности нормирования сопротивления изоляции СЭС [1].

Исследования, выполнявшиеся на протяжении ряда лет, показали, что процессы электрического старения низковольтной изоляции носят характер сравнительно медленно нарастающих разрушений, завершающихся пробоем. Это позволяет ставить вопрос о своевременном обнаружении нарастающих дефектов на ранних этапах их развития и о предотвращении, таким образом, внезапных отказов изоляции при эксплуатации СЭС. Применение методов диагностики под рабочим напряжением дает возможность перехода к установлению очередных сроков ремонта электро-

оборудования по результатам диагностики его состояния и отказу от ряда испытаний, выполняемых на отключенном ЭО.

В настоящее время для сетей с изолированной нейтралью система контроля состояния изоляции разработана и прошла испытания. Основным элементом системы является устройство пофидерного контроля состояния изоляции (ПКСИ) (рис. 1).

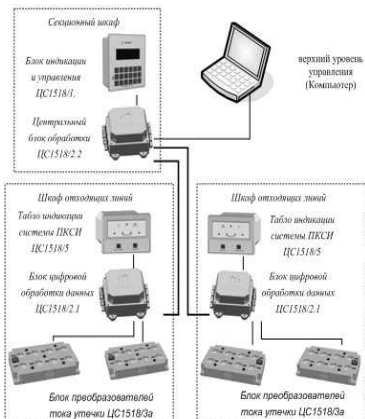


Рис. 1. Структурная схема системы ПКСИ

Существенным преимуществом рассмотренного технического решения является использование преобразователей дифференциальных токов нового образца в составе автоматизированной системы, которая помимо общего с устройствами сигнализации ОЗЗ контролируемого параметра – тока нулевой последовательности контролирует и обрабатывает дополнительную информацию, повышающую достоверность обнаружения присоединения с ОЗЗ – сдвиг фаз между напряжением и током нулевой последовательности на всех контролируемых присоединениях. Система осуществляет ряд принципиально важных функций: визуализацию краткой информации непосредственно на дисплее блока обработки ПКСИ о фидере с критически низким сопротивлением изоляции, хранение и передачу на верхний уровень управления этой информации.

Использование ПКСИ в составе программно-аппаратного комплекса даёт возможность непрерывного мониторинга состояния изоляции всех контролируемых присоединений, что необходимо для прогноза возможных ОЗЗ с достаточным для оперативных мероприятий запасом времени.

Результаты проведённых испытаний на экспериментальной базе ВИТУ показали, что датчики-преобразователи ПКСИ обладают существенной чувствительностью, а количество контролируемых фидеров может быть в пределах от 2 до 128.

Установка датчика-преобразователя на цепь заземления и его эффективная работа в этой цепи показала принципиальную возможность модификации системы ПКСИ в СЭС с глухозаземленной нейтралью.

Библиографический список

1. Системы контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью / Тишков А.А., Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф. // Технология ЭМС. – 2007. – № 3 (22).

2. **Внедрение** методов общего и пофидерного контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью / Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. // Электротехника 2030: тез. докл. IX симпозиума. – Перспективные технологии электроэнергетики, 2007.

3. **Тишков А.А.**, Павленок А.М. Разработка системы контроля состояния изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сб. научных проблем ВИ(ИТ). – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та., 2013.

В.В. Долгинин, студ.;
рук. Л.Г. Мигунова, к.т.н., доц.
(СамГТУ, г. Самара)

РАЗВИТИЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ОЭС СРЕДНЕЙ ВОЛГИ

Централизованная система противоаварийной автоматики (ЦСПА) ОЭС Средней Волги представляет двухуровневую систему для осуществления противоаварийного управления. Верхний уровень расположен в ОДУ Средней Волги и представляет собой управляющий вычислительный комплекс УВК. Устройства нижнего уровня расположены на трех энергообъектах: Балаковской АЭС, Жигулевской ГЭС и Заинской ГРЭС.

Недостатки существующей ЦСПА:

- Отсутствие расчета динамической устойчивости.
- Не позволяет наглядно оценить удаленность текущего режима от максимально допустимого.
- Не имеет удобного функционала для определения причин нарушения в работе расчетных модулей.

Для осуществления этих недостатков в ближайшее время будет осуществлен переход на ЦСПА третьего поколения, в которой будет осуществлена возможность:

- Выбора управляющих воздействий УВ по условию обеспечения динамической устойчивости.
- Использования новых видов УВ: импульсная разгрузка турбин и деление сети.

Дальнейшее развитие ЦСПА будет осуществляться в совершенствовании модели расчета динамической устойчивости. Для этого необходима информация о виде короткого замыкания и времени его отключения. Вместе с этим возникает проблема создание дополнительных каналов связи и каналов аварийных сигналов и команд. С увеличением количества оборудования возрастет нагрузка на оперативный персонал, который его обслуживает, в следствии чего могут быть допущены ошибки. Так же будет сложнее формировать графики ремонтов оборудования.

Библиографический список

1. **Иванов Е.Н.**, Трофименко В.В. Централизованная система противоаварийной автоматики ОЭС Средней Волги.

*Д.Г. Ефремов, И.Ю. Ефремова, аспиранты;
рук. И.З. Глушкин, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва; АО «РАСУ»)*

УПРАВЛЕНИЕ МАХОВИКОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Ранее было проведено исследование эффективности применения накопителей энергии различного вида для повышения динамической устойчивости электрической станции (ЭС) при коротких замыканиях (КЗ). Исследование показало, что одним из наиболее эффективных накопителей является маховиковый накопитель. Исходя из этого, проводятся детальные исследования маховикового накопителя энергии, а также предлагается система управления данным накопителем на ЭС при КЗ. В частности, были проведены исследования различных типов приводов маховикового накопителя, которые показали, что наиболее целесообразным типом привода для маховикового накопителя являются вентильная машина и машина постоянного тока с постоянными магнитами, так как они позволяют обеспечивать широкий диапазон частоты вращения маховика и высокую скорость нарастания тока статора. Также с некоторыми ограничениями возможно использование асинхронизированной синхронной машины (машины с двойным питанием). Разработана система управления маховиковым накопителем, данная система приведена на рис. 1.

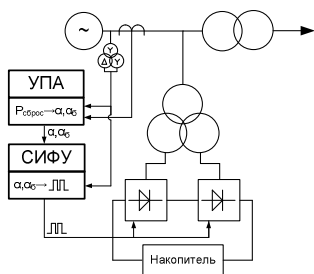


Рис. 1. Система управления накопителем: УПА – устройство противоаварийной автоматики, СИФУ – система импульсно-фазового управления

Отдельно рассмотрен вопрос о применении асинхронизированного синхронного турбогенератора (АСТГ) с двумя обмотками на роторе в качестве средства повышения динамической устойчивости параллельно работающего на шины станции синхронного генератора. В настоящее время разработку и производство таких машин ведет ОАО «Электросила». Разработаны два основных типа АСТГ: с водяным охлаждением (типа ТЗВА, мощностью 110 – 350 МВт) и воздушным охлаждением (типа ТЗФА, мощностью 110 – 160 МВт). Данные АСТГ уже установлены на некоторых объектах ОАО «Мосэнерго» (ТЭЦ-27, ТЭЦ-22).

Основная функция подобных генераторов – регулирование («ведение») режима по напряжению, т.е. работа АСТГ как в режимах выдачи, так и в режимах глубокого потребления реактивной мощности. Реализация данных функций достигается разделным управлением обмотками возбуж-

дения, расположенными на роторе и имеющими сдвиг между друг другом 90 градусов в пространстве, см. рис. 2).

Суть предложенного метода в следующем: в режиме КЗ управление возбуждением передается системе поддержания динамической устойчивости. Благодаря возможности АСТГ раздельно от напряжения управлять электромагнитным моментом, предложенная система обеспечивает перевод АСТГ в режим маховикового накопителя, что позволяет скомпенсировать разгон параллельно работающего на шины станции синхронного генератора. При работе в режиме маховикового накопителя, АСТГ переходит в режим работы с надсинхронной скоростью. После ликвидации КЗ, система поддержания динамической устойчивости обеспечивает торможение АСТГ путем передачи накопленной энергии в сеть. Таким образом предотвращается нарушение динамической устойчивости параллельно работающего на шины станции синхронного генератора.

Разработанная система управления маховиковым накопителем позволяет в автоматическом режиме на основе величины сброса мощности генератора определять требуемые углы открытия тиристорных преобразователей для компенсации разгоняющей мощности в режиме КЗ маховиковым накопителем и обеспечивать динамическую устойчивость параллельной работы генератора.

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. науч. тр. ин-та «Энергосетьпроект». – М.: Энергоиздат, 1982.

**И.Ю. Ефремова, Д.Г. Ефремов, аспиранты;
рук. И.З. Глускин, д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва; АО «РАСУ»)**

ПУСКОВОЙ ОРГАН ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ПО УГЛУ, ВЫЯВЛЕНИЕ МЕСТА И ВЕЛИЧИНЫ НЕБАЛАНСА МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Ранее был предложен алгоритм адаптивной настройки пускового органа (ПО) противоаварийной автоматики (ПА) по мощности. Исследова-

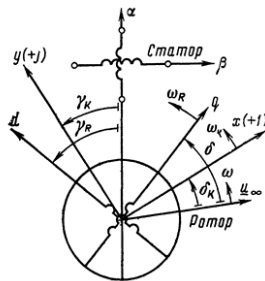


Рис. 2. Схема обмоток и направления осей АСТГ

ние эффективности данного алгоритма показало, что его применение способствует повышению пропускной способности сечения энергосистемы. В целях дальнейшего усовершенствования ПО ПА предлагается использовать ПО, фиксирующий перегрузку сечения по углу, а также осуществляющий выявление места и величины небаланса мощности в энергосистеме. Основное преимущество фиксации угла и скольжения перед фиксацией передаваемой мощности заключается в том, что при нарушении устойчивости угол нарастает монотонно, а скольжение всегда положительно, в то время как передаваемая мощность в силу ее нелинейной зависимости от угла не может превысить некоторого максимума, после прохождения которого снова уменьшается, причем скорость ее изменения меняет знак с положительного на отрицательный. Иными словами, фиксация угла обеспечивает большую, чем фиксация мощности, чувствительность. Предлагается алгоритм адаптивной настройки ПО ПА по углу, который отличается тем, что рассчитывает уставку в углах в режиме реального времени, а также осуществляет выявление места и величины небаланса мощности в энергосистеме. Выявление места небаланса осуществляется по следующему принципу: при изменении мощности в узлах i и j изменяются все относительные углы, связанные с углами i и j , причем имеет место изменение одного знака. Выявление величины небаланса мощности осуществляется по скольжению по следующей формуле:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta P. \quad (1)$$

Исследования эффективности предложенных алгоритмов проводились на примере тестовой энергосистемы в ПК Mathcad и ПК ДАКАР. Результаты исследований в двух программных комплексах совпали с высокой точностью и показали следующее: использование алгоритма адаптивной настройки ПО ПА по углу, как и в случае с ПО по мощности позволяет повысить пропускную способность сечения; дополнительно пропускная способность сечения повышается за счет использования более чувствительного ПО по углу, по сравнению с менее чувствительным ПО по мощности; алгоритмы выявления места и величины небаланса мощности позволяют выявить их с высокой точностью.

Учитывая предложенные выше принципы, адаптивный ПО ПА по углу, выявляющий величину и место небаланса мощности в энергосистеме работает следующим образом:

1. Ввод исходных данных.
2. Вычисление недостающих измерений.
3. Расчет уставок ПО. Расчет уставок ПО по углу производится по приведенным ранее алгоритмам для расчета уставок ПО по мощности. Разница в том, что уставки рассчитываются не в мощностях по сечениям,

а в углах между напряжениями по концам сечения, что более эффективно, так как ПО по углу обладает большей чувствительностью, чем ПО по мощности.

4. Сравнение измеряемого угла с уставкой. В случае превышения уставки переход к п 5.

5. Выявление места и величины небаланса.

5.1. Расчет изменения относительных углов.

5.2. Выявление места небаланса по изменению относительных углов: при возникновении небаланса в узле i все углы, связанные с i , изменятся в одном направлении.

5.3. Вычисление изменения скольжения для узла i .

5.4. Вычисление по изменению скольжения величину небаланса мощности по формуле (1).

6. При превышении уставки по углу пуск устройства АДВ с передачей информации о месте и величины небаланса в энергосистеме.

Данный алгоритм позволит рассчитывать уставку пускового органа для существующего в реальном времени режима работы энергосистемы, что повысит пропускную способность сечения, а также определять место и величину небаланса мощности в энергосистеме, что способствует в дальнейшем максимально эффективному выбору управляющего воздействия.

Библиографический список

1. **Иофьев Б.И.** Функционирование противоаварийной автоматики // Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем: сб. науч. тр. ин-та «Энергосетьпроект». – М.: Энергоиздат, 1982.

2. **Глускин И.З., Иофьев Б.И.** Противоаварийная автоматика в энергосистемах. Т. II. – М.: Знак, 2011.

*Д.А. Этингов, И.В. Бокарев, студенты;
рук. Д.С. Федосов, к.т.н.
(ИРНИТУ, г. Иркутск)*

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФАЗИРОВКИ ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ЦИФРОВОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Дифференциальная защита (ДЗ), использующая сравнение токов на сторонах защищаемого оборудования по величине и фазе, является одной из основных защит силовых трансформаторов [1]. Поскольку трёхфазные трансформаторы, как правило, имеют разные схемы соеди-

нения обмоток сторон высокого напряжения (ВН) и низкого напряжения (НН), требуется коррекция вторичных токов в плечах ДЗ не только по величине, но и по фазе. При применении цифровых терминалов ДЗ используется соединение вторичных обмоток трансформаторов тока (ТТ) в звезду со всех сторон защищаемого трансформатора, а фазовая коррекция токов выполняется цифровым путём [2].

На тяговых подстанциях (ТПС) железных дорог переменного тока происходит замена защит на микропроцессорные. Особенностью работы ТПС является наличие непрерывно изменяющейся во времени несимметричной тяговой нагрузки. Правильная компенсация угла сдвига между одноименными векторами токов ВН и НН для ДЗ трансформаторов ТПС возможна только при корректном задании группы соединения обмоток трансформатора и правильной сборке токовых цепей ДЗ. Однако снятие векторных диаграмм вторичных токов и проверка под нагрузкой ДЗ трансформаторов ТПС осложняется несимметричным характером нагрузки, что повышает вероятность ошибок при обслуживании защиты.

Авторами показано [3, 4], что убедиться в правильности сборки вторичных цепей ДЗ можно только при проверке защиты симметричной нагрузкой, которая на ТПС отсутствует. Для её искусственного создания устраивают опыт трёхфазного короткого замыкания при пониженном напряжении либо загружают трансформатор реактивным током [3], однако оба этих опыта являются трудоёмкими.

Для изучения данной проблемы разработана модель трансформатора с несимметричной нагрузкой в среде MATLAB Simulink, приведенная на рис. 1. Исследования на модели подтвердили невозможность правильной настройки ДЗ и выявления ошибок при сборке токовых цепей при несимметричной нагрузке.

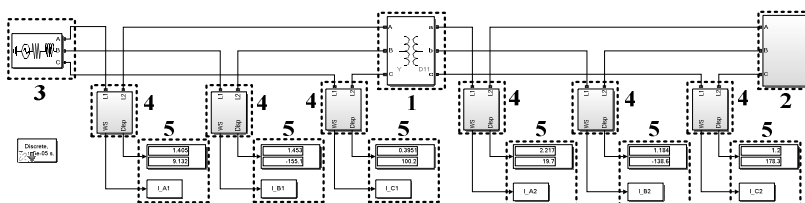


Рис. 1. Модель трансформатора с несимметричной нагрузкой в среде MATLAB Simulink: 1 – силовой трансформатор; 2 – несимметричная нагрузка; 3 – энергосистема; 4 – трансформаторы тока; 5 – блоки для отображения и экспорта токов плеч

Разработан алгоритм и программное обеспечение (советчик релейщика), позволяющие при любом характере нагрузки и при любых ошибках, допущенных при сборке токовых цепей ДЗ, определить одноименные фазы токов плеч ВН и НН и указать возможный вид ошибки. Прототип

программы разработан в среде программирования MATLAB. В качестве исходных данных программа использует модули и фазы токов в плечах защиты. При выявлении ошибок программа укажет, какие манипуляции необходимо провести для их устранения, и построит векторные диаграммы одноимённых вторичных токов.

Проверена работоспособность алгоритма и программы при различных схемах соединения обмоток силового трансформатора и ТТ, при ошибках маркировки выводов ТТ. Во всех случаях программа верно определяет одноимённые токи плеч ДЗ и указывает вид ошибки. В настоящее время завершается работа над графическим интерфейсом программы, оформляется заявка на регистрацию программы для ЭВМ.

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2016. – 464 с.
2. **Александров А.М.** Методика расчета уставок дифференциальной защиты трансформаторов (Seram T87) / Техническая коллекция Schneider Electric. Вып. № 9. – ПЭИПК, 2007.
3. **Висящев А.Н.,** Федосов Д.С. Особенности выполнения микропроцессорных дифференциальных защит трансформаторов тяговых подстанций [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы 5-й Международной научно-технической конференции (г. Сочи, 01 – 05 июня 2015 г.). – Режим доступа: <http://cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/materials/Posters.pdf>.
4. **Особенности** работы микропроцессорной дифференциальной защиты трансформаторов тяговых подстанций / Висящев А.Н., Федосов Д.С., Хамнуев А.В., Гудзь А.В.// Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: мат. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 21-25 апреля 2015 г.): в 2 т. / Под общ. ред. В. В. Федчишина. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – Т. 2. – С. 13 – 17.

Б.М. Гиёев, асп.;

*рук. Я.Л. Арцишевский, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ БАЛАНСИРУЮЩИХ КОМАНД НА УРОВНЕ 0,4 кВ

Основная задача энергоснабжающей компании состоит в том, чтобы обеспечить надежность электроснабжения потребителей на высоком уровне, особенно ответственных электроприемников даже при аварийных режимах. Устройства автоматическая частотная разгрузка (АЧР) как подсистема устройства противоаварийной автоматики (ПА) ограничивает нагрузку при аварийных режимах, связанных с дефицитом мощности. Однако, в настоящее время при работе устройств АЧР разгрузки потребителей осуществляется на уровне 10 кВ. При этом приоритетность по-

требителей оценивается не полностью, так как фидера 10 кВ питаются несколько трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ имеющих разную приоритетность и категоричность.

В ПУЭ дана рекомендация по применению устройств АЧР непосредственно в узлах нагрузки и соответственно современные технологии дают возможность решить эту проблему и обеспечить бесперебойности приоритетных приемников при работе устройств АЧР.

В работе рассмотрены способ реализации функции АЧР и ограничение нагрузки по командам диспетчеров на уровне 0,4 кВ путем интеграции имеющихся устройств, такие как существующие устройства АЧР, микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики (МП РЗА) фидеров 10 кВ, модифицированные счетчики АИИСКУЭ. Возможные варианты для реализации данного способа рассмотрены в [2].

Работа новая подсистема устройств АЧР начинается после срабатывания существующие устройства АЧР на уровне 10 кВ, от каждого подается команда на МП РЗ на отключение выключателя фидера. Далее МП РЗА формирует провал заданной длительностью в цикле О-В выключателя фидера. При этом модифицированные счетчики реагируют на этот провал и своим управляющим контактом отключают заданную нагрузку. Создание провала напряжения является особенностью рассматриваемого способа, достоинством данного варианта является простота его реализации, который базируется на модификации программного обеспечения и не требует дополнительных технических средств.

Другая особенность способа состоит в том, что последнее время ограничение нагрузки на уровне 0,4 кВ по командам диспетчеров тоже требует внимания, так как оно реализуется путем отключения фидеров 10 кВ и это может вызывать нарушение работы социально значимых электроприемников. При реализации новой функции селективного ограничения потребителей на уровне 0,4 кВ по этому способу не требуется дополнительный затрат на развертывание сети связи.

В этом направлении авторами были исследованы процессы возникновения дефицита мощности в отдельной части энергосистемы [3], исследована динамика снижения частоты и работы устройств АЧР с верификацией результатов в среде программного комплекса для моделирования энергосистем PSCAD. Была определена область применения способа, критерий возможности его применения в узлах нагрузки, где имеются синхронные электродвигатели, так как наличие таких двигателей искажает длительность провала напряжения, которые используется в качестве команды.

Библиографический список

1. Рабинович Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. –352 с.

2. **Надежность** электроснабжения ответственных потребителей 0,4 кВ при действии АЧР / Б.М. Гиёев, Я.Л. Арцишевский // Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты: мат. XXII междунар. науч.-техн. конф. – ТРАВЭК-2015, г. Москва.

3. **Моделирование** процессов снижения частоты при внезапном возникновении дефицита мощности в отдельной части энергосистемы / Б.М. Гиёев, Я.Л. Арцишевский // Энергетика, экология, надёжность и безопасность: мат. респ. науч.-техн. конф. – Душанбе, ТТУ им. академика М.С. Осими, 2016.

А.А. Колесников, В.Ю. Вуколов, к.т.н.;
рук. А.Л. Куликов, д.т.н.
(НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород)

ОРГАНИЗАЦИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6 – 35 кВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДВОЙНОЙ ЗАПИСИ

Для повышения эффективности защит распределительных сетей 6 – 35 кВ предлагается применение дифференциального способа в сочетании с методом двойной записи.

Двойная запись – способ ведения хозяйственных операций, при котором каждое изменение состояния средств отражается, по крайней мере, на двух счетах, обеспечивая общий баланс [1]. С помощью организации избыточной обработки информации о токах, измеренных на концах защищаемых объектов 6 – 35 кВ и сформированных в специальные матрицы, реализуется надежное функционирование дифференциальной защиты, исключая ее излишнее действие при повреждениях трансформаторов тока и линий связи.

В качестве примера рассматривается участок электрической сети 6 – 35 кВ (рис. 1), который представляется в виде графа. Дуги обозначают высоковольтные аппараты, а вершины – защищаемые элементы (шины, ЛЭП, и др.).

Дуги отображают факты коммутации и имеют вес, представляющий собой информацию о величине протекающего по ветви тока, полученного в результате измерений по средствам трансформаторов тока.

Применение двойной записи обеспечивает взаимосвязь между вершинами графа, что позволяет объединить их в единую целостную систему.

Функционирование защиты основывается на дифференциальном способе, согласно которому производится сравнение токов на отдельных участках и элементах сети [2]. Для всех вершин графа со степенью >1 составляются специальные уравнения в матричной форме для суммы токов в узлах с учетом избыточности измеряемой информации.

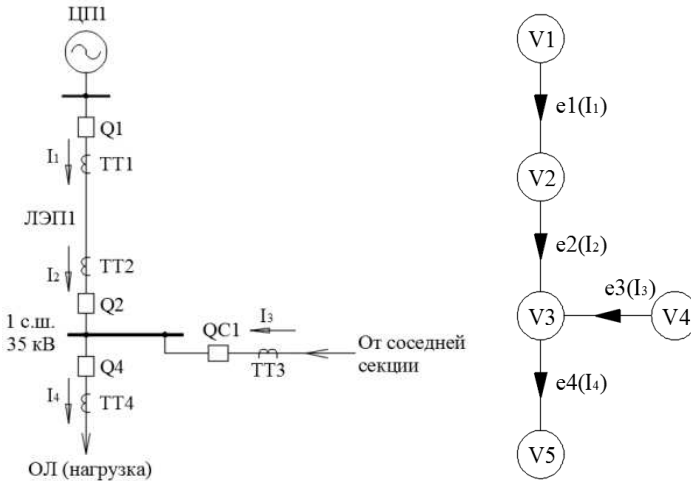


Рис. 1. Схема фрагмента распределительной сети и однонаправленный граф

Определяется, вызвано ли срабатывание пускового органа защиты коротким замыканием (КЗ), либо имеет место неисправность оборудования в контуре измерений токов (трансформаторов тока) или системы коммуникаций (линии связи). Так как каждая дуга графа отражается с одинаковым весом (значением тока) в матрицах вершин дважды: как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней одной матрицы, и как дуга, связанная с вершиной и направлена от нее другой матрицы, то при неисправности сумма входящих и исходящих токов в двух матрицах нарушается, но суммарный дифференциальный ток для всей сети остается равным нулю. При наличии КЗ и сохранении суммы токов для всей сети равной нулю, определяется неисправность трансформаторов тока или линии связи. При обнаружении КЗ и отсутствии неисправности происходит отключение поврежденного участка.

Выводы. Реализация предлагаемого способа позволяет организовать надежную дифференциальную защиту, имеющую алгоритмы проверки исправности трансформаторов тока и линий связи и, как результат, улучшить эффективность релейной защиты распределительных сетей 6 – 35 кВ.

Библиографический список

1. Кольвах О.И. Моделирование бухгалтерского учета. Ситуационно-матричный подход: монография / О.И. Кольвах. – М.: Вузовская книга, 2010. – 336 с.
2. Циглер Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты, принципы и применение – М.: Энергоиздат, 2005. – 273 с.

*Д.А. Жерновой, студ.,
И.В. Колесник, адъюнкт, О.А. Горев, инж.;
рук. Э.Н. Фоминич, д.т.н., проф.
(ВИ(ИТ) ВА МТО, г. Санкт-Петербург)*

СЕЛЕКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ С ГЛУХОЗАЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1000 В

Контроль состояния изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью в электроустановках до 1000 В в реальных условиях функционирования системы электроснабжения (СЭС), включающих различные режимы работы, является актуальной и сложной задачей. На надежность работы СЭС, электро- и пожаробезопасность электрооборудования существенно влияют предаварийные и аварийные режимы, старение изоляции, частота возникновения коротких замыканий (КЗ) и длительности существования ее повреждений. В связи с этим важна селективная оценка состояния изоляции распределительной сети в режиме реального времени. Требования по пожаробезопасности и надежности СЭС должен обеспечиваться адекватным развитием средств диагностирования потенциально опасных факторов.

Серьезной проблемой является недостаточность существующих технических средств и методов контроля за состоянием изоляции под напряжением. В настоящее время фиксируется значение сопротивления изоляции при периодических измерениях отключенного электрооборудования. Такое положение в обеспечении электро- пожаробезопасности, основанное на периодических измерениях сопротивления изоляции явно недостаточно, что является отражением проблемы диагностики в рассматриваемой области.

Контроль состояния электрической изоляции в системах электроснабжения напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью по токам утечки позволяет существенно уменьшить вероятность внезапных аварийных отключений в результате коротких замыканий в следствии старения изоляции.

Принципиально новым устройством способным осуществлять мониторинг состояния изоляции в действующей электроустановке является разрабатываемая система пофидерного контроля состояния изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Данная система предназначена для оценки состояния изоляции в кабельных распределительных сетях с глухозаземленной нейтралью до 1000 В с целью определения отходящих линий с развивающимися де-

фектами изоляции. Её использование позволит заблаговременно планировать профилактические мероприятия и ремонтные работы для предотвращения пробоев изоляции и замыканий.

Система регистрирует установившиеся значения тока нулевой последовательности с последующим сравнительным анализом и выделением кабельных линий с наибольшим током несимметричной утечки. Использование программно-аппаратного комплекса даёт возможность непрерывного мониторинга состояния изоляции всех контролируемых присоединений, что необходимо для прогноза возможных КЗ с достаточным для оперативных мероприятий запасом времени.

Отличительной особенностью системы является применение датчиков-преобразователей устанавливаемых непосредственно на контролируемых кабельных линиях, и осуществляющих аналого-цифровое преобразование сигналов получаемых от индуктивных датчиков, их цифровую фильтрацию, передачу в блоки обработки информации. Применение датчиков преобразователей вместо стандартных трансформаторов тока позволило получить высокую чувствительность и помехоустойчивость. Еще одной отличительной особенностью Системы является ее централизованная структура, что дало возможность проведения сравнительного анализа сигналов от всех контролируемых кабелей друг с другом. Это позволило применить не только абсолютные пороги срабатывания сигнализации, но и относительные – по сравнению со всеми остальными контролируемыми кабелями.

Применение системы позволит повысить надежность электроснабжения потребителей и увеличить межремонтный период электрооборудования, за счёт выполнения профилактических мероприятий и проведения ремонтных работ по фактическому состоянию.

Система позволит осуществлять мониторинг состояния изоляции присоединений, и будет являться инструментальной основой для диагностики изоляции в СЭС с глухозаземленной нейтралью под рабочим напряжением.

Библиографический список

1. **Разработка** системы контроля состояния изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью / Тишков А.А., Павленок А.М. // Сб. науч. проблем ВИ(ИТ). – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та., 2013.

2. **Системы** контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью / Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. // Технология ЭМС. – 2007. – № 3 (22).

3. **Внедрение** методов общего и пофидерного контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью / Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. // «Электротехника 2030» Перспективные технологии электроэнергетики: сб. тез. IX симпозиума, 2007.

М.А. Бутикова, студ.;
рук. Л.М. Колесов, к.т.н., доц.,
В.В. Можжухина, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ РАБОТЫ РЕЗЕРВНОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ СУММУ ТОКОВ НЕСКОЛЬКИХ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ, ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

В настоящее время в большинстве случаев для действия при коротких замыканиях (КЗ) на стороне низшего напряжения (НН) трансформаторов используется резервная ступень токовой или дистанционной защиты (ДЗ) линии. Недостатком этих защит является низкая чувствительность при КЗ за трансформаторами подстанции противоположного конца линии электропередачи (ЛЭП) за счет влияния подпитки со стороны смежных систем.

Технической задачей данной работы является повышение эффективности функционирования резервных защит участка электрической сети с несколькими источниками питания. Предлагается выполнить резервную ДЗ, использующую информацию о токах, протекающих на смежных ЛЭП, примыкающих к противоположной подстанции. Для передачи информации о токах предполагается применение волоконно-оптических каналов связи. Измерительный орган сопротивления (ИОС) предлагаемой защиты включается на сумму токов всех питающих ЛЭП и напряжение на шинах в месте установки защиты. На рис. 1 приведена схема подключения предлагаемой системы ДЗ.

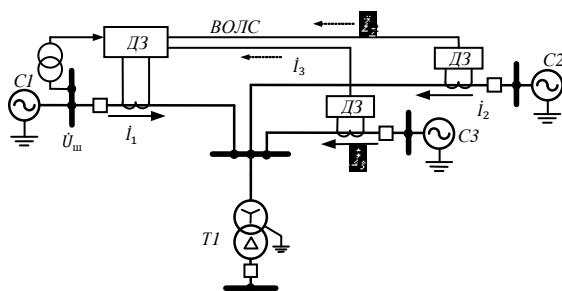


Рис. 1. Схема подключения предлагаемой ДЗ участка сети

Замер измерительного органа сопротивления (ИОС) ДЗ, установленной на подстанции 1, в случае трех питающих ЛЭП определяется следующим образом:

$$\underline{Z}_{\text{зам}} = \frac{\dot{U}_{\text{ш}} - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{\text{л1}}}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3},$$

где $\dot{U}_{\text{ш}}$ – напряжение на шинах подстанции в месте установки защиты, $\underline{Z}_{\text{л1}}$ – сопротивление линии 1, $\dot{I}_{1(2,3)}$ – ток в линии 1 (2, 3).

Для повышения чувствительности при двухфазных КЗ на стороне НН трансформаторов данный ИОС включается на фазные величины. Для исследования предлагаемой защиты была создана модель участка электрической сети с тремя источниками питания, ЛЭП и трансформатором, подключенным к шине подстанции, объединяющей концы питающих ЛЭП, модель ИО традиционной и предлагаемой ДЗ.

Исследования работы указанных защит проводились в различных режимах работы сети: изменение соотношения мощностей, соотношения и угла сдвига ЭДС питающих систем, соотношения длин линий, мощности трансформатора с учетом РПН, переходного сопротивления в месте КЗ, мощности и $\cos \varphi$ нагрузки. Результаты исследования показали, что соотношения мощностей и углов ЭДС питающих систем, соотношения сопротивлений участков линий и систем оказывают малое влияние на замер сопротивления предлагаемой ДЗ.

При внешних КЗ за пределами ЛЭП 1 и двух смежных линий 2 и 3 замер сопротивления предлагаемой ДЗ равен сопротивлению нагрузки трансформатора подстанции. При КЗ на смежных линиях возможно срабатывание предлагаемой ДЗ, однако это не приводит к ее неправильному функционированию. Для обеспечения несрабатывания в нагрузочном режиме и при внешних КЗ характеристика срабатывания отстраивается только от сопротивления нагрузки. Для обеспечения селективности при КЗ за трансформатором подстанции время срабатывания органа выдержки времени устройства защиты выбирается больше времени срабатывания резервной защиты трансформатора подстанции и смежных линий. Кроме того, для обеспечения несрабатывания в нагрузочных режимах достаточно обеспечить отстройку от сопротивления нагрузки только трансформатора подстанции.

Техническим результатом применение предлагаемого устройства является обеспечение чувствительности защиты выше существующей, т.к. при КЗ за трансформатором подстанции предлагаемое устройство оказывается как бы включенным в сеть с односторонним питанием, где отсутствует заглубляющее защиту влияние подпитки от энергосистем С2 и С3 и перетока мощности по ЛЭП.

Библиографический список

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7: Дистанционная защита линий 35 – 330 кВ. – М.: Энергия, 1966.

М.В. Двойников, маг.;
рук. А.А. Фомичев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ МЕЖВИТКОВЫХ КЗ В ДВУХОБМОТОЧНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ И АЛГОРИТМ ИХ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ДЗТ

Выявление межвитковых КЗ является важной задачей, решение которой позволит предотвратить развитие серьезного повреждения в силовом трансформаторе и уберечь его от дорогостоящего ремонта.

Межвитковые КЗ, возникающие в силовых трансформаторах, могут быть полными (ПВЗ) и неполными (НВЗ). НВЗ, возникающее в многопроводных обмотках, переходит в ПВЗ после выгорания изоляции между параллельными проводами замкнувшихся витков [1].

Для выявления данного вида повреждения разрабатываются устройства релейной защиты (УРЗ) или совершенствуются уже существующие. При этом традиционно к УРЗ подводятся сигналы от трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН). К таким защитам относятся: дифференциальная защита трансформатора (ДЗТ), защита, реагирующая на циркулирующий ток, дифференциальная защита обратной последовательности (дополнение к ДЗТ), защита, основанная на пространственно-векторном алгоритме Парка [2] и др.

Некоторые из них обладают повышенной чувствительностью к межвитковым КЗ и выполняются либо в виде дополнения к ДЗТ, либо как самостоятельные защиты.

Также существуют защиты, использующие датчики, находящиеся внутри бака трансформатора (датчики поля рассеяния, установленные вблизи поверхности магнитопровода, датчики тока, встроенные в саму обмотку). Достоинством таких защит является фиксация тока в самой точке повреждения, величина которого при межвитковом КЗ велика, или эффектов, создаваемых этим током, что повышает чувствительность. Недостатком является то, что такие защиты должны реализовываться при проектировании силового трансформатора [1].

Стоит отметить широко распространенную газовую защиту для трансформаторов с масляным охлаждением, которая реагирует на межвитковые КЗ, но действует довольно медленно, так как необходимо время для образования продуктов разложения масла. Кроме того, газовую защиту нельзя использовать на сухих трансформаторах.

Целью данной работы является разработка алгоритма распознавания и сигнализации малых межвитковых КЗ (ПВЗ около 2.5 % витков и менее) в двухобмоточных трансформаторах на основе классической ДЗТ.

Для анализа межвитковых КЗ разработана модель силового двухобмоточного трансформатора мощностью 16 МВА с высшим напряжением 110 кВ в программном комплексе Matlab [3], а также модель дифференциальной защиты с торможением [4].

При моделировании ДЗТ осуществлялось выравнивание вторичных токов сторон трансформатора заданием базисных токов, компенсация фазового сдвига при необходимости (со стороны Y). Выполнена блокировка по второй гармонике дифференциального тока для предотвращения ложной работы ДЗТ при бросках тока намагничивания и в переходных режимах внешних КЗ.

Начальный ток срабатывания ДЗТ по условию отстройки от тока небаланса не позволяет ей реагировать на некоторые малые ПВЗ, а также делает её нечувствительной к НВЗ в обмотках трансформатора (для работы при НВЗ требуется ток срабатывания $(0.03 - 0.05)I_{номТ}$ [1]).

В ходе исследования моделировались повреждения (внутренние и внешние КЗ) и ненормальные режимы работы трансформатора со схемами соединения $Y_n/\Delta-11$ ($Y/\Delta-11$) и $Y_n/Y-0$.

На основании полученных результатов предложен вариант алгоритма выявления межвитковых КЗ на ранней стадии. Он заключается в фиксации скорости изменения дифференциального тока в определенных фазах (в зависимости от схем соединения обмоток) при малых ПВЗ. Алгоритм является дополнением к ДЗТ, используя все преимущества этой защиты, и блокируется при её срабатывании.

При малых ПВЗ значение дифференциального тока недостаточно для срабатывания ДЗТ, но скорость его изменения от значения в нормальном режиме работы до значения при повреждении высока. Признаком ПВЗ является изменение значения дифференциального тока в одной или двух фазах в зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора, поэтому его изменение одновременно в трех фазах не приводят к неправильной работе алгоритма.

Результаты моделирования показывают, что данный способ сигнализации межвитковых КЗ способен выявлять ПВЗ 2.5 % и менее витков обмотки трансформатора.

В дальнейшем планируется уточнение уставки по скорости изменения дифференциального тока, разработка моделей других видов силовых трансформаторов, с возможностью моделирования межвитковых КЗ, оценка пригодности предложенного алгоритма к этим трансформаторам, а также моделирование и анализ неполных витковых замыканий и разработка способа их выявления.

Библиографический список

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

2. **Comparing** power transformer turn-to-turn faults protection methods: Negative sequence component versus space vector algorithms / Oliveira, Luis M.R.; Cardoso, A.J. Marques / Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2015 IEEE 10th International Symposium, 1 - 4 Sept. 2015. – Pp. 289 – 295.

3. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в Matlab. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

4. **Шнейрсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

И.Е. Ильяшенко, маг.;
рук. Л.М. Колесов, к.т.н., доц.,
В.В. Можжухина, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ С ОТВЕТВЛЕНИЕМ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТОКИ ПИТАЮЩИХ СТОРОН, ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ОТВЕТВЛЕНИЯ

Для повышения чувствительности дистанционной защиты ЛЭП к коротким замыканиям за трансформатором ответвления предложено использовать дополнительный измерительный орган сопротивления (ИОС), включаемый на токи сторон защищаемого объекта и напряжение на шинах в месте установки защиты. Замер предлагаемого ИОС определяется выражением:

$$\underline{Z}_{зам} = \frac{\dot{U} - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2},$$

где \dot{U} – напряжение на шинах в месте установки защиты, \underline{Z}_1 – сопротивление линии до ответвления, \dot{I}_1 – ток на стороне защищаемой линии, где установлена защита, \dot{I}_2 – ток на противоположной стороне защищаемой линии.

Создана математическая модель предлагаемой защиты, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Математическая модель данного алгоритма выполнена в среде MATLABс расширением Simulink и состоит из следующих блоков: Блока выделения первой гармоники измеренных фазных токов и напряжений, блока расчета комплексных действующих значений измеренных фазных токов и напряжений, блока задания уставок, измерительного органа, блоков, реализующих орган срабатывания и орган возврата, а также блоков, реализующих блокировку защиты при внешних КЗ.

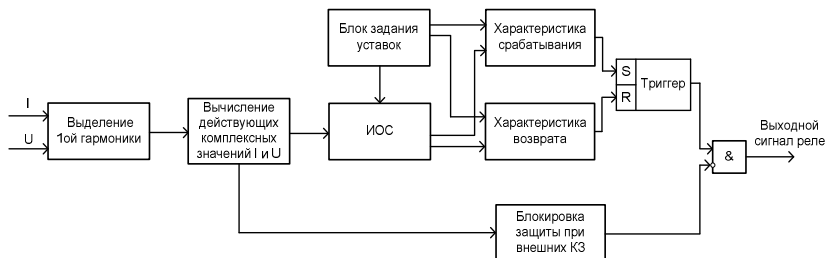


Рис. 1. Структурная схема математической модели предлагаемого алгоритма работы РЗ

Выделение первой гармоники производится посредством фильтра Фурье. Вычисление комплексных значений фазных токов и напряжений с помощью блока, преобразующего модуль и фазу входного сигнала в комплексное значение. В блоке, реализующем ИОС, производится расчет замера сопротивления по предлагаемому алгоритму. В блоке задания уставок задаются координаты точек характеристики срабатывания и характеристики возврата, а также длина, удельное активное и реактивное сопротивление участка линии до ответвления. Характеристика срабатывания представляет собой либо прямоугольник, располагающийся в первом и втором квадрантах комплексной плоскости, либо такой же прямоугольник, но с вырезом в правом нижнем углу. Срабатывание защиты происходит в том случае, если замер ИОС является решением системы неравенств, составленных из уравнений прямых, соединяющих точки характеристики срабатывания. Возврат защиты происходит при выходе замера ИОС из характеристики возврата. Характеристика возврата задается аналогично характеристике срабатывания, однако отличается от неё на коэффициент возврата. Блокировка защиты производится при превышении уставки по величине и взаимному углу токов питающих сторон линии. Сигналы с органов срабатывания и возврата подаются на триггер, который в зависимости от конфигурации входных сигналов формирует сигнал на срабатывание либо на возврат. Этот сигнал вместе с сигналом от блокировки формирует общий выходной сигнал реле.

В ходе работы была проведена проверка правильности работы предлагаемого алгоритма при КЗ в различных точках сети с учетом влияния различных факторов.

Проведенные эксперименты показали высокую эффективность использования данного принципа исполнения защиты и её высокую чувствительность к КЗ на стороне НН трансформатора ответвления.

Библиографический список

1. Анализ функционирования резервной дистанционной защиты, использующей сумму токов двух сторон, на линии с несколькими ответвлениями / Л.М. Колесов, В.В. Можухина // CIGRE, 2015.

Л.В. Сидорова, студ.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИЧЕСКИХ РЕЛЕ, В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 – 10 кВ

Ведение. В распределительных кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ для защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) основное применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), область применения которых ограничена соотношением между собственным емкостным током защищаемого присоединения $I_{C\text{собс}}$ и суммарным емкостным током сети $I_{C\Sigma}$ [1]

$$I_{C\text{собс}^*} = I_{C\text{собс}} / I_{C\Sigma} \leq 1 / (1 + K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} K_{\text{ч.мин}}), \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,3$ – коэффициент отстройки; $K_{\text{ч.мин}} = 1,25 - 1,5$ – минимальное значение коэффициента чувствительности (для защиты с действием на сигнал 1,25, с действием на отключение – 1,5); $K_{\text{пер}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока в защите в переходных режимах при дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ).

Для ТЗНП, выполненных с применением электромеханических реле тока (например, РТ-40), реагирующих на среднеквадратичное значение измеряемой величины, рекомендуется принимать $K_{\text{пер}} \approx 4 - 5$ [1], что ограничивает область их применения присоединениями с $I_{C\text{собс}^*} \leq \sim 0,1$. В [2] на основе исследований, выполненных с применением метода физико-математического моделирования, показано, что для ТЗНП на электромеханической базе величину коэффициента $K_{\text{пер}}$ в (1) можно уменьшить до значений 1,5 – 2, что существенно расширяет область возможного применения защиты.

В настоящее время при проектировании ТЗНП взамен электромеханических реле тока все более широкое применение получают их статические аналоги на микроэлектронной базе (РСТ11–14, РСТ140 и др.). В технической литературе отсутствуют какие-либо обоснованные рекомендации по выбору значений $K_{\text{пер}}$ при расчетах уставок ТЗНП со статическими реле тока. Электрические схемы статических реле содержат выпрямитель входного переменного тока, поэтому такие реле в отличие от электромеханических реагируют не на среднеквадратичное, а на среднев्यпрямленное значение измеряемой величины, что существенно влияет на работу ТЗНП в переходных режимах при ДПОЗЗ. Потому исследование особенностей работы ТЗНП на базе статических реле тока в пере-

ходных режимах ОЗЗ актуально для уточнения методики расчета их уставок по току срабатывания и области возможного применения.

Метод исследований. Учитывая сложность математического описания переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6 – 10 кВ и в схеме статического реле тока для решения поставленной выше задачи использовалось имитационное моделирование на ЭВМ в среде системы моделирования Matlab. Методы моделирования переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения с применением системы Matlab достаточно хорошо отработаны и известны [2 и др.]. Потому основной задачей в данной работе являлась разработка математической имитационной модели статического реле тока. Для исследований было выбрано чувствительное реле тока серии РСТ11-04, наиболее широко применяемое в ТЗНП.

Имитационная модель реле тока РСТ11-04 выполнена на основе полной электрической схемы и параметров ее элементов с использованием стандартных блоков пакетов SimPowerSystem и Simulink системы моделирования Matlab. Адекватность и достоверность модели проверена сравнением токов срабатывания реле на минимальной и максимальной уставках и времени срабатывания при синусоидальном входном токе, полученных соответственно на модели, с техническими данными реле. Имитационная модель для исследований динамических режимов работы ТЗНП включала также модель кабельной сети 6 кВ и модель кабельного трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) типа ТЗЛМ.

Результаты исследований на имитационной модели показали, что наиболее тяжелым режимом функционирования ТЗНП на базе статических реле тока являются ДПОЗЗ, при которых пробой изоляции возникают каждый полупериод рабочей частоты, а гашения заземляющей дуги происходят при одном из последних переходов через нулевое значение свободной составляющей переходного тока ОЗЗ. При такой разновидности ДПОЗЗ значения коэффициента $K_{пер}$ в (1) максимальны и приближенно могут быть приняты равными 2,0 – 2,5.

Выводы: Результаты исследований могут быть использованы для уточнения методики выбора уставок по току срабатывания ТЗНП на базе статических реле тока и более точной оценки области их возможного применения.

Библиографический список

1. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001.
2. Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования / Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С. // Новости Электротехники. – 2010. – № 2 (62). – С. 36 – 40.

*Е.В. Нечаев, маг., М.В. Шелудько, студ.,
А.А. Яблоков, м.н.с.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКА ТОКА ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

В связи с развитием в современной электроэнергетике концепции «Интеллектуальных энергетических сетей с активно-адаптивной сетью» [1], которая актуализирует такие свойства системы как способность к самовосстановлению после сбоев в работе, повышение ее надежности и эффективности в целом, важной задачей становится создание высокоточных устройств на базе микропроцессорной электроники.

В научно-образовательном центре ИГЭУ «Высоковольтные измерительные преобразователи и трансформаторы» ведутся разработки по созданию цифровых измерительных трансформаторов тока, которые не искажают форму кривой тока при коротких замыканиях, обеспечивают высокий класс точности, являются пожаро- и взрывобезопасными, при их эксплуатации отсутствуют наводки на вторичные цепи.

В цифровом измерительном трансформаторе тока используется несколько датчиков тока, устанавливаемых на каждую фазу. Марка стали магнитопровода выбиралась с максимально узкой петлей гистерезиса, а его габариты, число витков вторичной обмотки и её параметры были вычислены математически, исходя из заданных требований к устройству, и оптимизированы по результатам экспериментальных данных.

С целью проверки работоспособности датчика тока в разных режимах работы и его соответствие заданным требованиям были проведены следующие испытания:

- 1) исследование характеристик магнитопровода;
- 2) исследование насыщения магнитопровода;
- 3) исследование остаточной намагниченности магнитопровода;
- 4) исследование нагрева трансформатора тока при его работе на номинальном токе;
- 5) определение класса точности трансформатора тока в диапазоне токов $[0,01I_n; 1,2I_n]$ в соответствии с [2] и при токах короткого замыкания;
- 7) исследование частотных характеристик трансформатора тока.

Для исследования характеристик магнитопровода была собрана экспериментальная установка и создана программа в среде LabView, которая позволяет определять динамическую петлю гистерезиса, активную и реактивную мощности. Путем обработки полученных данных были опреде-

лены основная кривая намагничивания и средняя кривая намагничивания исследуемой стали, которые в дальнейшем использовались при математическом моделировании для более точного проектирования разрабатываемого устройства.

Исследование нагрева трансформатора тока выполнялось на двух образцах с различными диаметрами вторичной обмотки и числом витков. Испытания проводились с помощью аппаратно-программного комплекса Ретом-30КА и тепловизора Testo 882. Результаты опытов показали, что трансформатор с большим диаметром вторичной обмотки и меньшим числом витков ($t_{max} = 43,8$ °С) греется меньше, чем образец с меньшим диаметром вторичной обмотки и большим числом витков ($t_{max} = 51,4$ °С). Также с помощью установки Ретом-30КА было зафиксировано насыщение магнитопровода при токе $I_{раб} = 3,9$ кА с номинальной нагрузкой $R_n = 1$ Ом.

Результаты исследований класса точности в ФБУ «Ивановский ЦСМ» показали, что разработанные образцы трансформатора тока имеют класс точности 0,1s в диапазоне токов $[0,01I_n; 1,2I_n]$ согласно [2].

Авторы публикации хотят выразить благодарность ФБУ «Ивановский ЦСМ» за помощь в проведении испытаний трансформатора тока на класс точности.

Библиографический список

1. **Основные** положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. – 2012.
2. **ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010.** Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные трансформаторы тока. – 2012.

А.С. Тимофеев, студ.;
рук. Г.А. Филатова, ст. преп.,
О.А. Добрягина, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ «УЧЕБНАЯ ТЕХНИКА»

Введение. В настоящее время недоотпуск электроэнергии потребителям, вызванный авариями на линиях электропередач, несет за собой значительный материальный ущерб. Для снижения ущерба необходимо в кратчайшие сроки находить и устранять повреждения на линиях. Одну из важнейших ролей в этом процессе играют средства определения места

повреждения (ОМП). Особенно важную роль ОМП играет на линиях большой протяженности, проходящих через леса, по пересеченной местности. В настоящее время наибольшее распространение получили методы и устройства ОМП, основанные на измерении параметров аварийного режима (ПАР), к достоинствам которых относят простоту реализации, отсутствие генерирующей аппаратуры, возможность применения на линиях любой конфигурации. Большой вклад в изучение методов и устройств ОМП внес Е.А. Аржанников [1]. В настоящее время на кафедре АУЭС ИГЭУ ведется разработка методов ОМП в сетях 6 – 35 кВ на основе ПАР под руководством В.А. Шуина [2].

Цель работы. Поскольку в связи с устареванием лабораторных стендов тематика ОМП в курсе «Автоматика ЭЭС» представлена недостаточно, появилась необходимость в разработке и реализации новых лабораторных работ на базе современных стендов «Учебная Техника» и микропроцессорных (МП) терминалов, имеющих в учебной лаборатории (таких как «Сириус-ОМП» и «Сириус-2МЛ») [3].

Основными **задачами** лабораторных работ по ОМП являются:

- сборка схемы сети (рис. 1 – 2) на учебном стенде и ее отладка;
- подключение МП терминала к учебному стенду;
- изучение основ работы с терминалом и программой СТАРТ-3;
- выполнение экспериментов (в т.ч. изучение влияния искажающих замер факторов на точность ОМП при различных видах КЗ) и запись осциллограмм в COMTRADE-формате;
- обработка полученных данных;
- определение преимуществ и недостатков каждого из изучаемых методов ОМП: односторонний и двусторонний замер;
- выполнение контрольных заданий.

Подключение МП терминалов по цепям напряжения осуществляет с помощью делителей напряжения (380 В/100 В). Токовые цепи подключается к стенду напрямую, без трансформаторов тока, ввиду малых величин токов.

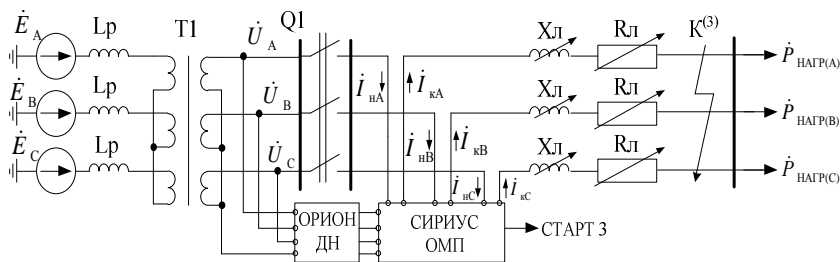


Рис. 1. Схема сети, реализуемая на стенде (односторонний замер)

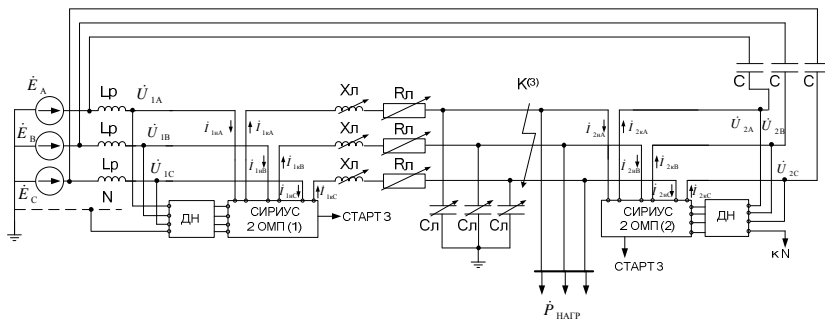


Рис. 2. Схема сети, реализуемая на стенде (двусторонний замер)

Для моделирования линии электропередачи с двухсторонним питанием блок линии «запитывается» либо от двух источников (трехфазный источник напряжения и машина переменного тока), либо от одного источника, с имитацией поворота векторов напряжения (например, с использованием блока емкости и токоограничивающего реактора) (рис. 2).

На сегодняшний день лабораторные работы внедряются в учебный процесс бакалавров 4 курса.

Библиографический список

1. **Аржанников Е.А.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
2. **Шуин В.А.,** Филатова Г.А. Определение места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса // Радиотехника, электротехника и энергетика: мат. XXI МНТК. – Т. 3. – М.: МЭИ, 2015.
3. **Лебедев В.Д.,** Румянцев И.Н. Модернизация лабораторных стендов для освоения учебных курсов и проведения исследований по релейной защите и автоматике // Тинчуринские чтения: мат. докл. XI междунар. молодежной науч. конф. – Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016.

А.С. Волков, маг.;
рук. Л.М. Колесов, к.т.н., доц.,
В.В. Можжухина, асп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ АВТОТРАНСФОРМАТОРА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТОКИ СТОРОН ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ, ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА СТОРОНЕ НИЗШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время для действия при коротких замыканиях (КЗ) на стороне низшего напряжения (НН) автотрансформатора (АТ) исполь-

зуются резервная ступень дистанционной (ДЗ) или токовой защиты (ТЗ), подключаемые к трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН) одной из сторон АТ: высшего (ВН) или среднего напряжения (СН). В большинстве случаев данные типы защит оказываются не чувствительными при КЗ на стороне НН автотрансформатора из-за влияния подпитки с противоположной стороны и перетока мощности через автотрансформатор.

Для повышения чувствительности резервной защиты к КЗ на стороне НН АТ предлагается выполнить дополнительное реле сопротивления, включаемое на токи сторон ВН и СН автотрансформатора и напряжение на шинах в месте установки защиты, компенсированное падением напряжения на сопротивлении обмотки соответствующей стороны АТ. Схема дополнительного измерительного органа сопротивления (ИОС) показана на рис. 1.

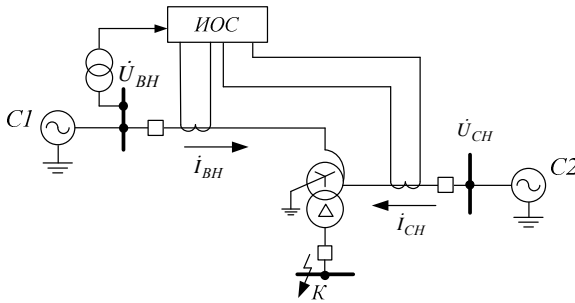


Рис. 1. Схема подключения дополнительного ИОС ДЗ АТ

Замер ИОС, подключаемого к трансформатору напряжения стороны ВН АТ, определяется выражением:

$$Z_{\text{зам}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВН}} - \dot{i}_{\text{ВН}} \cdot Z_{\text{ВН}}}{\dot{i}_{\text{ВН}} + \dot{i}_{\text{СН}} / K_{\text{T ВН-СН}}},$$

где $\dot{U}_{\text{ВН}}$ – напряжение на шинах ВН АТ, $Z_{\text{ВН}}$ – сопротивление обмотки ВН АТ, $\dot{i}_{\text{ВН}}$ – ток на стороне ВН АТ, $\dot{i}_{\text{СН}}$ – ток на стороне СН АТ, $K_{\text{T ВН-СН}}$ – коэффициент трансформации автотрансформатора.

Для повышения чувствительности при двухфазных КЗ на стороне НН АТ данный ИОС включается на фазные токи и напряжение.

Для проверки предлагаемого алгоритма работы дополнительного реле сопротивления проведены исследования и сравнительный анализ результатов замеров сопротивления измерительного органа (ИО), основанного на предложенном принципе, и ИО традиционного исполнения при КЗ в различных точках сети с учетом влияния различных факторов с использованием программного комплекса Matlab/Simulink.

Исследования проводились при изменении: мощности АТ, номера отпайки РПН, угла сдвига фаз ЭДС второй системы по отношению к первой, отношения модулей ЭДС систем, мощностей систем С1 и С2, нагрузки стороны НН АТ, переходного сопротивления в месте КЗ на стороне НН, погрешности ТТ при внешних КЗ до 10 %.

Проведенные на математических моделях испытания показали, что традиционные защиты во многих случаях оказываются не чувствительными при КЗ на стороне НН АТ. В то же время, предлагаемое дополнительное реле позволяет обеспечить чувствительность при КЗ на стороне НН АТ во всех рассмотренных случаях.

Библиографический список

1. Патент на полезную модель 159710 Российская Федерация. МПК H02H3/40, H02H7/04. Устройство для дистанционной защиты автотрансформатора / Колесов Л.М., Можжухина В.В.; опубли. 20.02.2016, Бюл. 5.

М.А. Андреев, студ.;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ СОГЛАСОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ АВТОТРАНСФОРМАТОРА И ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Дистанционная защита (ДЗ) автотрансформатора (АТ) предназначена для обеспечения возможности согласования линий высшего и среднего напряжения (ВН и СН) с защитами АТ, для обеспечения дальнего резервирования в сетях ВН и СН, а также для частичного резервирования основных защит АТ [1].

Анализ согласования ДЗ АТ и линий в сетях напряжением 220 и 110 кВ производится на примере подстанции московского МПЭС № 720 «Заря». Упрощенная схема рассматриваемой сети представлена на рис. 1.

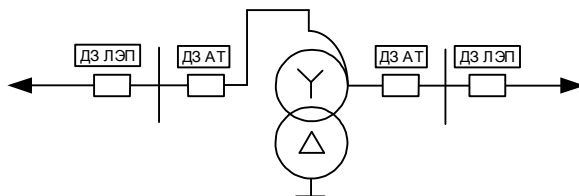


Рис. 1. Упрощенная схема рассматриваемой сети

Для реализации резервной дистанционной защиты автотрансформатора используется терминал серии SIPROTEC 7SA6 фирмы «Siemens».

В соответствии со стандартом [2] ступени дистанционной защиты, направленные в сторону смежного напряжения, как правило, используются для целей полноценного или частичного ближнего резервирования в зоне действия основных защит АТ.

Вследствие соотношения сопротивлений сторон (обмоток) АТ (как правило, обмотка НН АТ имеет наибольшее сопротивление), согласование по сопротивлению срабатывания ступеней ДЗ, направленных в сторону АТ, с защитами присоединений смежного напряжения АТ оказывается затруднительным. В таких случаях стандарт советует руководствоваться одним из трех возможных вариантов решения указанной проблемы:

- параметры срабатывания ступени от всех видов коротких замыканий ДЗ на стороне ВН (СН) выбираются по условию отстройки от КЗ на шинах смежных напряжений СН и НН (ВН и НН) с коэффициентом отстройки $K_{отс} = 0,8$.

- параметры срабатывания ступени от всех видов коротких замыканий ДЗ на стороне ВН (СН) выбираются по условию охвата обмоток смежных напряжений СН и НН (ВН и НН) с коэффициентом чувствительности $K_{ч} = 1,2$; для обеспечения несрабатывания защиты в сети смежного напряжения СН (ВН), выполняется взаимное блокирование действия ступеней ДЗ на стороне ВН (СН) при пуске ступеней ДЗ с направлением в сеть СН (ВН), выполняемое посредством обмена бинарными сигналами между комплектами ДЗ сторон ВН и СН АТ.

- параметры срабатывания ступени от всех видов коротких замыканий ДЗ на стороне ВН (СН), как и во втором варианте, выбираются по условию охвата обмоток смежных напряжений СН и НН (ВН и НН); для обеспечения селективности указанной ступени ДЗ выполняется ее согласование только по времени действия со ступенями (как правило, последними) защит на стороне СН и НН (ВН и НН).

Рассмотрены все варианты применимо к нашей схеме сети.

Первый вариант представляется наиболее простым. При этом, обеспечивается селективность ступени, но зона резервирования ограничена, т.к. в нее входит только часть обмотки ВН (СН) АТ.

Второй вариант представляется наиболее сложным, так как необходимо выполнить взаимное блокирование действия ступеней ДЗ при пуске ступеней ДЗ с направлением в сеть посредством обмена бинарными сигналами между комплектами ДЗ. К плюсам этого варианта можно отнести тот факт, что все обмотки полностью попадают в зону действия защиты. Однако для селективного действия ступени, необходимо согласование (по сопротивлению и времени срабатывания) с токовыми защитами на стороне НН АТ, что значительно затрудняет расчет.

Из-за большой величины сопротивления обмотки НН при обеспечении чувствительности на низшей стороне в рассматриваемой сети воз-

можно неселективная работа защиты из-за наложения зоны действия защиты АТ на зону действия защит ЛЭП и защит объектов примыкающих к дальнему концу ЛЭП.

Третий вариант предусматривает наиболее полноценное резервирование защит АТ, при минимальном обеспечении быстродействия. Отстройка по времени осуществляется относительно резервных защит АТ направленных в сеть. В этом случае обеспечивается селективность работы защиты, однако время срабатывания оказывается очень большим.

Возможно совмещение первого и второго вариантов, а именно обеспечить требуемую чувствительность только на стороне ВН и СН без накладки зон действия. При этом не вся обмотка НН будет находиться в зоне действия защиты, однако будет обеспечена селективность и приемлемое время срабатывания.

Наложение зоны действия ступени защиты АТ направленной в сторону смежного напряжения и зоны действия первой ступени защиты АТ допустимо по причине действия обеих ступеней на один выключатель.

Библиографический список

1. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ: Схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. **Методические** указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) автотрансформаторов ВН 220 – 750 кВ. – СТО 5694007-29.120.70.135-2012. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.

А.Е. Басова, студ.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ВЫБОРА УСТАВОК ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Продольная дифференциальная токовая защита (ДТЗ) без торможения получила широкое применение в качестве основной защиты на линиях и других элементах электрических сетей и электростанций. Основным расчетным условием для выбора тока срабатывания ДТЗ является отстройка от тока небаланса, обусловленного погрешностями трансформаторов тока (ТТ) в переходном режиме внешнего короткого замыкания (КЗ) [1 и др.]:

$$I_{с.з} = K_{отс} I_{нб.макс} = K_{отс} \varepsilon K_{одн} K_{пер} I_{к.расч.макс}, \quad (1)$$

где $K_{отс} = 1,3 - 1,5$ – коэффициент отстройки; ε – относительное значение полной погрешности по току ТТ, соответствующее установившемуся

режиму КЗ; $K_{одн}$ – коэффициент однотипности ТТ; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий переходный режим (апериодическую составляющую тока КЗ).

При использовании в защите однотипных ТТ, выбираемых по кривым предельной кратности при 10 %-й погрешности, $\varepsilon = 0,1$, $K_{одн} = 0,5$. При отсутствии в измерительном органе тока отстройки от влияния апериодической составляющей $K_{пер} = 2$. При указанных значениях ток небаланса $I_{нб.п.макс} = \varepsilon K_{одн} K_{пер} I_{к.расч.макс} = K_{нб} I_{к.расч.макс} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 2 = 0,1 I_{к.расч.макс}$. (2)

Целью работы являлась проверка обоснованности значений коэффициентов, входящих в расчетные выражения (1) и (2). Для проверки использовалось имитационное моделирование в системе Matlab. Имитационная модель включала модель защищаемого объекта – трехфазной ЛЭП с двусторонним питанием, модели ТТ, измерительного органа тока, средства измерений и визуализации. При исследованиях определялись значения: ε , $K_{пер}$ и $K_{нб}$ с учетом влияния различия характеристик намагничивания ТТ по концам ЛЭП, остаточной индукции в магнитопроводах ТТ, постоянной затухания апериодической составляющей тока КЗ, величины вторичной нагрузки ТТ. Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что при установке по концам ЛЭП ТТ с наилучшими и наихудшими характеристиками намагничивания $\varepsilon_{макс} \approx 0,3$, $K_{пер.макс} \approx 3$, чему соответствует $K_{нб.макс} \approx 0,09$. Таким образом, хотя действительные значения ε и $K_{пер}$ могут отличаться от рекомендуемых расчетных значений, в целом результирующее значение $K_{нб}$ примерно соответствует значению, получаемому при использовании существующей методики расчета тока срабатывания ДТЗ.

Библиографический список

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

А.Н. Борисова, студ.;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА НЕБАЛАНСА В ФУНКЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Микропроцессорные устройства релейной защиты трансформаторов выпускаются различными фирмами-изготовителями, как отечественными, так и зарубежными. Функция дифференциальной защиты в этих устройствах имеет различные характеристики, для освоения которых каждое

устройство сопровождается большим количеством технической документации. Были разработаны стандарты ФСК, в которых уделяется внимание соответствию защитных функций устройства требованиям нормативных документов при применении его для различных защищаемых объектов.

Выполнение схемы и расчеты уставок дифференциальной защиты трансформаторов имеют ряд особенностей по сравнению с выполнением схемы и расчетами уставок дифференциальных защит других элементов. К данным особенностям относятся:

1) необходимость отстройки от бросков намагничивающего тока, возникающих при включении ненагруженного трансформатора (автотрансформатора) под напряжение (на холостой ход) или при восстановлении напряжения после отключения внешнего КЗ в питающей сети;

2) необходимость отстройки от токов небаланса, обусловленных неполным выравниванием действия неодинаковых вторичных токов в плечах дифференциальной защиты, что вызывается:

- невозможностью точной установки расчетных чисел витков (дробных) уравнительных обмоток;

- регулировкой коэффициента трансформации защищаемого трансформатора (автотрансформатора) с РПН; этим вызывается изменение вторичных токов только в одном из плеч дифференциальной защиты;

- разностью намагничивающих токов трансформаторов тока в плечах защиты (в практических расчетах ее принято считать равной току намагничивания или полной погрешности ε худшего из ТТ). Эта составляющая тока небаланса, характерная для всех дифференциальных защит, может быть особенно значительной для дифференциальных защит трансформаторов, поскольку они характеризуются большими и значительно отличающимися друг от друга сопротивлениями нагрузки трансформаторов тока в плечах защиты и параметрами трансформаторов тока.

Также при работе дифференциальной защиты трансформатора должны быть учтены различия в амплитудах и фазовых углах токов сторон трансформатора, наличие тока нулевой последовательности при внешних КЗ на землю у трансформаторов, работающих с заземленной нейтралью, регулирование трансформатора под напряжением, т.к. эти факторы приводят к увеличению тока небаланса.

Для анализа функционирования дифференциальной защиты в различных режимах в системе Matlab выполнена модель силового двухобмоточного трансформатора, а также модели трансформаторов тока, позволяющие учитывать различные характеристики намагничивания стали [1]. На основе этих моделей производится расчет токов в нагрузочном режиме и режиме внешнего трехфазного КЗ.

Функция дифференциальной защиты в каждом устройстве имеет разные характеристики срабатывания, а также различные способы расчета

тока небаланса. Также имеются отличия в величинах коэффициентов, используемых для расчета.

В данной работе были рассмотрены терминалы ДЗТ следующих фирм-изготовителей: ООО «АББ Силовые и Автоматизированные системы», «АРЕВА Передача и Распределение», в настоящее время – «Альстом», «Siemens AG», НПП «ЭКРА» [2, 3, 4, 5]. Был произведен анализ коэффициентов для расчета токов небаланса, возникающих в защите в нормальном режиме и при внешнем КЗ и рассчитаны эти токи. Результаты расчета сравниваются и находится их отношение к току нагрузки и току КЗ соответственно.

Данная работа – часть работы по исследованию дифференциальной защиты трансформатора. В дальнейшем предполагается создание модели ДЗТ и уточнение методики расчета уставок.

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.
4. **Методические** указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства ООО АББ Силовые и Автоматизированные Системы. – СТО 56947007-29.120.70.98-2011. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
5. **Методические** указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ЗАО «АРЕВА Передача и Распределение». – СТО 56947007-29.120.70.100-2011. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.

*А.А. Лебедев, А.А. Лутохин, студенты;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДУГОВОМ ЗАМЫКАНИИ В КОНЦЕ ЛЭП ДЛЯ ВЫБОРА ПОЛИГОНАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Дистанционной защитой (ДЗ) является направленная защита с относительной селективностью, выполняемая с использованием реле сопротивления (РС) – измерительного реле, работа которого определяется местоположением возникающего короткого замыкания по отношению

к месту его включения [1]. Характеристика срабатывания ДЗ задается в комплексной плоскости Z полного сопротивления активными и реактивными составляющими. Характеристика срабатывания РС 1-й степени представлена на рис. 1. В общем случае характеристика имеет вид полигонального многоугольника, задаваемого отрезками по осям координат R и X , а также углом наклона φ – близким к характеристическому углу линии (2). Ограничение сверху определяется уставкой срабатывания $X_{уст}$. Ограничение справа выбирается на определенном расстоянии от характеристики короткозамкнутой линии с целью охвата дуговых повреждений на расстоянии $R_{уст}$. Полигональные характеристики РС обладают большей чувствительностью к дуговым замыканиям.

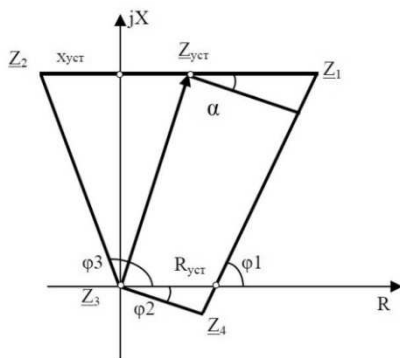


Рис. 1. Характеристика срабатывания

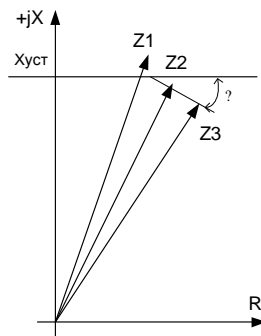


Рис. 2. Векторы сопротивлений

Условия выбора уставок активной $R_{уст}$ и реактивной $X_{уст}$ составляющих сопротивления срабатывания для первой степени ДЗ при КЗ на шинах противоположной ПС определяются условием (3):

$$(R + jX)_{CP} \leq k_{отс} \cdot Z_L, \quad (1)$$

где $k_{отс}$ – коэффициент отстройки (определяет зону действия 1-й степени защиты с учетом погрешностей измерительных трансформаторов, дистанционных органов и параметров сети) – 0,85 – 0,95; Z_L – полное сопротивление линии.

Необходимо определить уставку с учетом переходного сопротивления в месте КЗ ($R_{дуги}$).

На рис. 1 угол α обеспечивает повышение селективности при внешних дуговых повреждениях в конце линии или на шинах противоположной подстанции. Короткое замыкание (КЗ) может сопровождаться дугой, вследствие чего к комплексному сопротивлению замера добавляется $R_{дуги}$, которое изменяет значение вектора сопротивления по модулю и фазе, и результирующий вектор сопротивления при внешнем КЗ может

попасть в зону действия первой ступени. Угол α обеспечивает блокировку зоны внешних дуговых замыканий.

Проектирование дистанционной защиты выполняется для линий электрических сетей в соответствии с заданием на выпускную квалификационную работу бакалавров.

Значение угла наклона α при проектировании дистанционной защиты определяется двумя способами: математически и графически. Расчет замеров комплексного сопротивления на входе защиты выполняется с помощью программы «TKZ3000».

Графически угол α определяется построением семейства векторов сопротивления Z при КЗ в конце линии (рис. 2) с учетом сопротивления $R_{\text{дуги}}$ и заданием угла ЭДС системы отличным от нуля по отношению к углу генератора. Из этих векторов выбирается наиболее отклонившийся вектор, разность углов между сопротивлением при КЗ без $R_{\text{дуги}}$, и крайним отклонившимся сопротивлением и даст угол α .

Математически α определяется следующим образом

$$\alpha = \arctg((X - k_{\text{отс}} \cdot X_{\text{ак}}) / (k_{\text{отс}} \cdot R_{\text{ак}} - X \cdot \text{ctg } \varphi_L)), \quad (2)$$

где X – рассматриваемая уставка по реактивному сопротивлению первой ступени; $k_{\text{отс}}$ – определен выше, $X_{\text{ак}}$, $R_{\text{ак}}$ – расчетные значения сопротивления при КЗ через переходное сопротивление на противоположном конце ВЛ при перетоке активной мощности от шин в сторону ВЛ.

Библиографический список

1. **Федосеев, А.М.** Релейная защита электрических систем / А.М. Федосеев. – М.: Энергия, 1980.
2. **Рекомендации** по расчету и выбору параметров срабатывания защит линий 110 – 220 кВ ООО НПП «ЭКРА» (Проект) / ОАО «ФСК ЕЭС», ООО «Исследовательский центр «Бреслер». – Чебоксары: Изд-во ИЦ «Бреслер», 2009.
3. **Рекомендации** по выбору уставок дистанционной защиты от всех видов КЗ терминала защиты 7SA 522. – Киев, Министерство топлива и энергетики Украины, 2004.

Д.А. Лебедева, студ.;
рук. О.В. Фролова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Токковая направленная защита нулевой последовательности применяется при необходимости обеспечения защиты высоковольтных линий электропередач от замыканий на землю. Она характеризуется включени-

ем цепей тока на фильтр токов нулевой последовательности, а цепей напряжения (реле направления мощности) на фильтр напряжения нулевой последовательности [1]. В нормальном режиме работы участка электросети система токов и напряжений является симметричной, то же самое касается междуфазных коротких замыканий. В данном случае, как напряжение, так и ток нулевой последовательности равны нулю. В случае возникновения замыкания на землю система становится несимметричной – возникает ток и напряжение нулевой последовательности.

При одновременном включении фаз выключателя кратковременно возникает неполнофазный режим работы линии, характеризуемый разрывом на контактах выключателя одной или двух фаз. В связи с этим в линии кратковременно появляется ток нулевой последовательности. Длительность прохождения тока нулевой последовательности при включении выключателя с трехфазным приводом такова, что от него представляется возможным отстроиться по времени без введения выдержки времени. При этом необходимая отстройка обеспечивается выходным промежуточным реле с временем срабатывания 70 – 100 мсек. При использовании выключателей с пофазным приводом замедление на срабатывание, которое имеет выходное промежуточное реле, уже недостаточно для отстройки от неполнофазного режима. Отстройка от указанного режима должна производиться или по току или по времени.

Расчет неполнофазных режимов в сетях с номинальным напряжением 110 кВ и выше усложняется учетом зарядной мощности линий. Емкости отдельных фаз линии, работающей в неполнофазном режиме, не равны друг другу. При этом зарядные токи в схемах каждой последовательности, строго говоря, определяются напряжением всех трех последовательностей [2].

Для анализа влияния неполнофазных режимов на работу токовой защиты нулевой последовательности в системе Matlab [3] выполнена модель схемы линии с односторонним питанием (рис. 1).

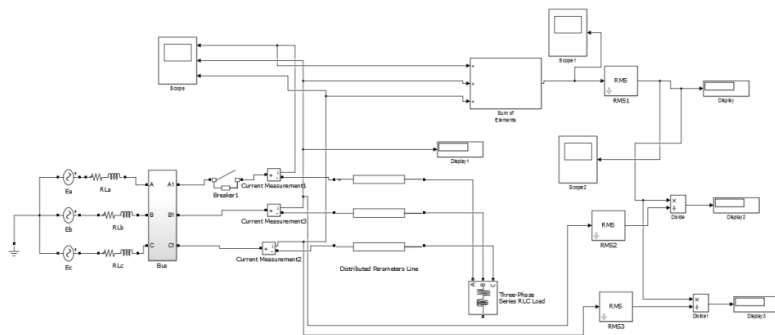


Рис. 1. Модель схемы в программном комплексе Matlab/Simulink

При исследовании неполнофазных режимов уделялось внимание особенностям элементов электрической сети, приводящим к увеличению тока нулевой последовательности, которое в свою очередь может повлиять на работу токовой защиты нулевой последовательности.

При расчете модели на дисплее выводятся установившиеся значения токов $3I_0$ и I_{cp} и кроме того приведены осциллограммы токов (рис. 2).

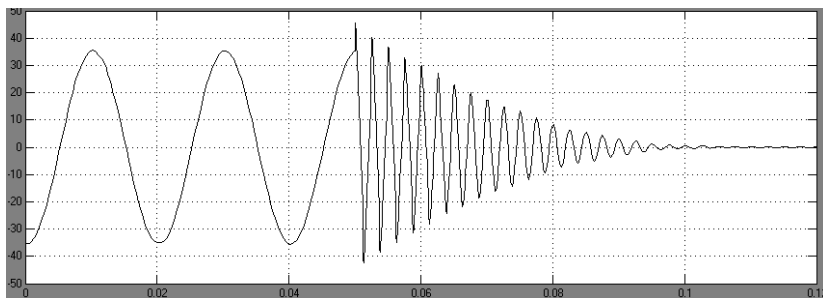


Рис. 2. Осциллограмма тока нулевой последовательности в неполнофазном режиме при неодновременном замыкании фаз выключателя

Библиографический список

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.
2. Кожин А.Н., Рубинчик В.А. Релейная защита линий с ответвлениями. – М.: Энергия, 1967.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 288 с.

*К.Д. Морозова, В.А. Строгов, студенты;
рук. Г.А. Филатова, ст. преп.,
(ИГЭУ, г. Иваново),
А.С. Кормушкин
(ООО «Сименс», г. Москва)*

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ ТЕРМИНАЛА SIPROTEC 7SJ62/64

Введение. Устройства SIPROTEC 4 7SJ62/64 являются цифровыми многофункциональными устройствами защиты и управления присоединений шин, работающими на базе мощного микропроцессора (рис. 1).

Устройства SIPROTEC 4 7SJ62/64 могут использоваться для защиты линий в сетях с заземленной, глухо заземленной, изолированной или компенсированной нейтралью; подходят для защиты линий с одно- или многосторонним питанием в радиальных или кольцевых сетях. Устройства включают защиту двигателя, применимую для асинхронных машин.

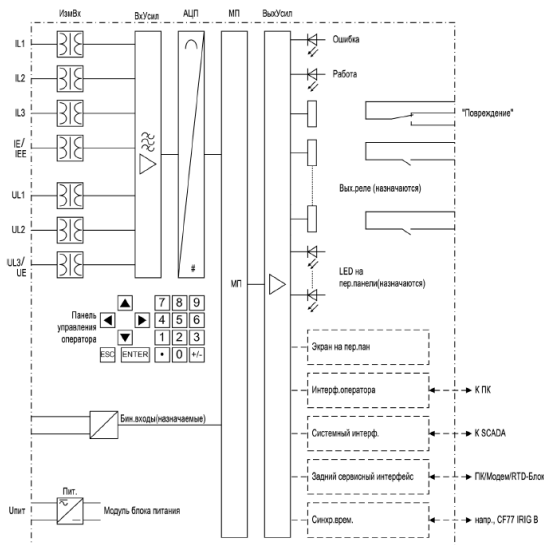


Рис. 1. Структурная схема цифрового многофункционального устройства защиты 7SJ621/622

Устройства включают функции, необходимые для защиты, контроля положения выключателей и управления выключателями в схемах с непосредственным подключением к шинам или в полуторных схемах. Устройства подходят для выполнения функций резервирования дифференциальных защит линий, трансформаторов, генераторов, двигателей и шин всех классов напряжения. Базовой функцией устройства является ненаправленная максимальная токовая защита (МТЗ) (50, 50N, 51, 51N) [1].

Целью работы явилась разработка лабораторного стенда для практических упражнений с устройствами SIPROTEC 4 типа 7SJ62/64 на базе оборудования, имеющегося на кафедре АУЭС ИГЭУ.

Были поставлены следующие **задачи**:

1. Изучение основных защитных функций терминалов 7SJ62/64, а также руководств по их эксплуатации;
2. Изучение программных пакетов DigsI и Siga;
3. Создание проекта в DigsI: конфигурирование параметров терминала, работа в матрице ранжирования, создание файла CFC-логики;
4. Монтаж электрической схемы с использованием терминала 7SJ62/64, модели трехфазного выключателя (блок со стенда «Учебная техника»), источника питания постоянного напряжения, вспомогательных и соединительных элементов (клемм, проводов и т.д.).

Итогом работы явилось внедрение в учебный процесс лабораторной работы «Управление трехфазной моделью выключателя с помощью тер-

минала SIPROTEC 7SJ62/64» в курсе «Микропроцессорные защиты» для магистрантов. В ходе работы за 4 академических часа бригада студентов создает в Digsig проект конфигурации устройства и реализует сборку схемы, согласно раздаточному и справочному материалу [1, 2]. Далее происходит проверка работы: при нажатии функциональной клавиши (F1) должно происходить отключение лабораторного выключателя; при нажатии клавиши (F2) – включение выключателя. Информация о положении выключателя (РПО/РПВ) должна выводиться в программе Siga, посредством организации обратной связи «Терминал – выключатель».

Планируется создание лабораторных работ и практических упражнений на базе стенда, таких как: работа с редактором дисплея Digsig 4 с использованием терминала 7SJ64; переключение набора уставок в зависимости от тока и/или времени; программно-временное управление – мигание светодиодов; индикация направления потока энергии; создание новой блокировки и другие. Благодаря собранной схеме выполнения работ будет более наглядным – срабатывание выходных реле терминала повлечет за собой включение/отключение модели выключателя. Перечисленные упражнения не требуют обязательного подключения источника переменного тока и напряжения (например, Ретом), однако могут выполняться или проверяться с любым испытательным комплексом для устройств релейной защиты.

Библиографический список

1. <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/Protection/overcurrent-feeder-protection/Pages/7SJ62.aspx>.
2. <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/Protection/Engineering-Evaluation-Diagnostic-Software/Pages/DIGSI-4.aspx>.

А.В. Панащатенко, маг.;
рук. И.Е. Иванов, асс.,
С.Н. Литвинов, асс.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО СИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ИЕЕЕ С37.118

Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) напряжений и токов развивается с 80-х гг. прошлого столетия [1]. В настоящее время число устанавливаемых в электроэнергетических систе-

мах (ЭЭС) устройств СВИ (УСВИ) постоянно увеличивается. По состоянию на июнь 2015 г. на территории Российской Федерации внедрено около четырехсот подобных устройств [2]. Векторные измерения могут быть использованы для решения множества различных задач электроэнергетики, таких как верификация моделей элементов ЭЭС, выявление низкочастотных колебаний, оценка устойчивости и определение запасов устойчивости, калибровка измерительных трансформаторов и др. [3]. Сетевые компании выражают заинтересованность в решении прикладных задач на базе СВИ [4], а мнение о том, что функция СВИ станет повсеместно интегрироваться в терминалы релейной защиты, было высказано уже почти десять лет назад [5]. В ИГЭУ разрабатываются высокоточные измерительные преобразователи напряжения и тока с цифровым интерфейсом. Учитывая изложенное, *актуальной* является реализация в этом интерфейсе функции СВИ.

Основная цель настоящей работы заключается в создании алгоритма СВИ, реализации этого алгоритма на аппаратной платформе, а также всесторонней верификации его функционирования. *Методом исследования* при построении алгоритма СВИ является математическое моделирование с использованием программных комплексов MATLAB и LabVIEW. В качестве аппаратной платформы, на которой будет функционировать создаваемый программный код, предварительно выбрана встраиваемая система «CompactRIO» («National Instruments»), представляющая собой современную гибкую архитектуру для сбора данных и управления.

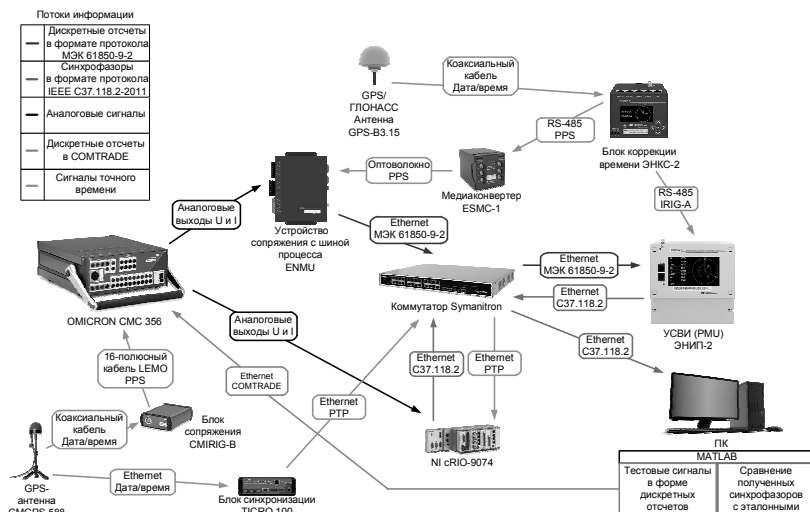


Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда для тестирования УСВИ

На первом этапе работы происследованы механизмы цифровой обработки сигналов, необходимые для реализации СВИ, создана базовая версия программного кода, разработана структурная схема тестирования УСВИ (рис. 1), а также скомпонован испытательный стенд в соответствии с представленной структурной схемой. В качестве коммерческого УСВИ, выполняющего функцию одного из средств верификации качества данных, вычисляемых создаваемым УСВИ, на стенде смонтирован блок «ЭНИП-2» (ООО «Инженерный центр „Энергосервис“»). Следующей стадией работы является непосредственная аппаратная реализация разработанного алгоритма СВИ, а также создание банка тестовых сигналов в соответствии со стандартом IEEE C37.118.1-2011.

Библиографический список

1. **A.G. Phadke**, J.S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Springer, 2008.
2. **Опыт** разработки, внедрения и эксплуатации системы мониторинга переходных режимов в ЭЭС России / Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М. [и др.] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. – Сочи, 2015.
3. **NASPI** Technical Report "NASPI 2014 Survey of Synchrophasor System Networks – Results and Findings", North American Synchrophasor Initiative, July 2015.
4. **Объединенный** семинар исследовательских комитетов B5 и D2 РНК СИГРЕ/ Российский национальный комитет СИГРЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cigre.ru/news/industry/2149/>, свободный (20.12.2016).
5. **Implementation** and performance of synchrophasor function within microprocessor based relays / M. Adamiak, B. Kasztenny // Protection and Control Journal, GE Multilin. – December 2007. – Pp. 35 – 45.

*А.В. Панацатенко, маг.;
рук. И.Е. Иванов, асс.,
В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ СТАНДАРТА IEEE C37.118

В настоящее время в энергосистемах по всему миру устанавливаются устройства синхронизированных векторных измерений (СВИ) [1]. Наличие точно синхронизированных комплексных значений токов и напряжений (далее называемых «синхрофазорами») потенциально может использоваться для решения множества различных задач, например, следующих [1 – 3]: визуализация режимных параметров; определение фактических параметров схем замещения элементов электроэнергетической системы (ЭЭС); выявление межзональных низкочастотных колебаний; оценка состояния режима электрической сети; послеаварийный анализ предшест-

вующего режима ЭЭС. Очевидно, качество решения задач на базе СВИ напрямую зависит от точности устройств СВИ (УСВИ) в отношении вычисления ими синхрофазоров и частоты. При этом стандарт [4], посвященный векторным измерениям, практически не регламентирует, какие алгоритмы обработки мгновенных значений напряжений и токов должны применяться в УСВИ для получения необходимых выходных данных. Это обуславливает *актуальность* изучения и сопоставления различных методов вычисления значений параметров, требуемых стандартом [4]: синхрофазоров, частоты и скорости изменения частоты. Справедливость подобного тезиса подтверждается тем фактом, что точность ряда коммерческих УСВИ не удовлетворяет требованиям стандарта, что было выявлено в ходе сравнительного тестирования [5]. В работе поставлена *задача* всестороннего исследования типичных механизмов цифровой обработки сигналов, используемых в УСВИ, а также создания комплексного алгоритма, имитирующего функционирование УСВИ. *Методом исследования* является математическое моделирование с применением программного обеспечения MATLAB.



Рис. 1. Блок-схема цифровой обработки сигналов с целью реализации СВИ

На рис. 1 представлена блок-схема, отражающая основные этапы и изученные (в ряде случаев – модифицированные) алгоритмы цифровой обработки сигналов для получения необходимых выходных данных. При наличии нескольких альтернатив жирным шрифтом выделены варианты, предварительно отобранные в качестве предпочтительных. Вычислительные эксперименты в MATLAB подтверждают работоспособность предлагаемого комплексного алгоритма, а в дальнейшем планируется его аппаратная реализация.

Библиографический список

1. **Measurements** get together / S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai, V. Terzija // IEEE Power and Energy Magazine, Jan.-Feb. 2009. Reprinted in Special Issue: Smart Grid-Putting it All Together, a 2010 reprint journal from PES. – Pp. 15 – 23.
2. **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.
3. **Real-world** synchrophasor solutions / E.O. Schweitzer and D.E. Whitehead // Proc. 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers, March 30-April 2, 2009.
4. **IEEE** Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Standard C37.118.1-2011.
5. **Современный** тестовый стенд для испытания устройств синхронизированных векторных измерений / Балабин М.А., Лаврушенко Н.Б., Наумкин Р.И. // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013.

Т.С. Фролова, студ.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МЕТОДИКА ВЫБОРА УСТАВОК РЕЗЕРВНЫХ СТУПЕНЕЙ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ НА ЛЭП С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Введение. На ЛЭП 110 – 220 кВ с односторонним питанием в качестве основных и резервных защит от междуфазных коротких замыканий (КЗ) применяются токовые или дистанционные защиты (ДЗ) со ступенчато-зависимыми характеристиками выдержки времени. Основной проблемой при применении указанных защит является обеспечение эффективности дальнего резервирования (ДР) при несимметричных КЗ за смежными трансформаторами понизительных подстанций с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» (Y/Δ).

Постановка задачи. Наиболее эффективное решение в части ДР дает применение ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания.

В соответствии с существующими методиками параметры настройки полигональных характеристик резервных ступеней ДЗ (уставки) по сопротивлению срабатывания на ЛЭП с односторонним питанием выбираются из условий отстройки от нагрузочных режимов без КЗ и обеспечения требуемой чувствительности к металлическим КЗ и КЗ через переходное сопротивление при повреждениях в конце зоны ДР. Однако в существующих методиках не учитывается совсем или учитывается весьма приблизительно существенное влияние на условия выбора уставок таких факторов, как трансформации Y/Δ и различное влияние на чувствительность переходного сопротивления в месте повреждения при симметричных и несимметричных КЗ в условиях трансформации Y/Δ .

В данной работе дается анализ комплексного влияния указанных факторов на работу резервных ступеней ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания в целях уточнения методики выбора параметров их срабатывания по условиям чувствительности к КЗ за трансформатором Y/Δ .

Метод исследований. Анализ влияния трансформации Y/Δ в сочетании с другими факторами на отстроенность от нагрузочных режимов без КЗ и чувствительность при КЗ в зоне ДР выполнен с использованием аналитического решения для реактивной и активной составляющих замера реле сопротивления (РС) ДЗ, полученного для схемы замещения на рис. 1, и имитационного моделирования в среде системы Matlab.

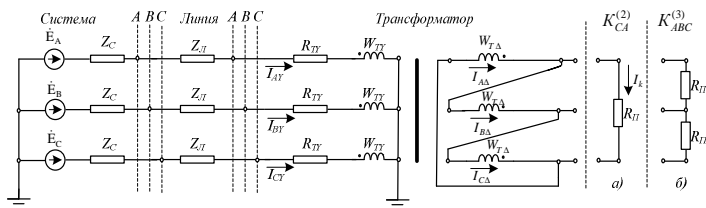


Рис. 1. Расчетная трехфазная схема замещения для определения токов и напряжений в месте установки ДЗ при КЗ за трансформатором $Y/\Delta-11$

Результаты исследований. При трехфазных КЗ за трансформатором $Y/\Delta-11$ активная и реактивная составляющие замера РС для всех трех фаз одинаковы и имеют вид

$$R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{л} + R_{Г} + R_{Г}; \tag{1}$$

$$X_{AB} = X_{BC} = X_{CA} = X_{л} + X_{Г}, \tag{2}$$

где $R_{л}$ – значение переходного сопротивления в месте КЗ, приведенное к стороне высшего напряжения трансформатора.

Для схемы замещения по рис. 1, получены аналитические выражения для реактивной и активной составляющих замера реле сопротивления

(РС), включенных на «петли КЗ» разных фаз. Например, при двухфазном КЗ между фазами С и А $K_{CA}^{(2)}$ (рис. 1, а) расчетные выражения для активной и реактивной составляющих первичного сопротивления на зажимах РС основных и неосновных фаз, включенных соответственно на «петли» КЗ фаз С и А и А и В, имеют вид:

$$R_{CA} = R_{Л} + R_T + \frac{R'_{Л}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{3}(X_C + X_{Л} + X_T); \quad (3)$$

$$X_{CA} = X_{Л} + X_T - \frac{\sqrt{3}}{3}(R_C + R_{Л} + R_T + \frac{R'_{Л}}{2}); \quad (4)$$

$$R_{AB} = R_{Л} + R_T + \frac{R'_{Л}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3}(X_C + X_{Л} + X_T); \quad (5)$$

$$X_{AB} = X_{Л} + X_T + \frac{\sqrt{3}}{3}(R_C + R_{Л} + R_T + \frac{R'_{Л}}{2}). \quad (6)$$

Аналогичные выражения получены также для несимметричного трехфазного КЗ через переходное сопротивление, возникшего при перекрытии крайних фаз А и В на среднюю фазу С (рис. 1, б).

Достоверность полученных аналитических соотношений проверена на имитационной модели «ЛЭП – ДЗ», выполненной в Matlab.

Вывод. На основе полученных соотношений предложены уточнения методики выбора уставок резервных ступеней ДЗ по условиям чувствительности при КЗ за трансформатором $Y/\Delta-11$.

Н.В. Лебедева, студ.;
рук. В.А. Шуин, д.т.н., проф.,
В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПАКТНОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ 6 – 10 кВ

Через распределительные кабельные сети напряжением 6 – 10 кВ распределяется большая часть вырабатываемой в стране электроэнергии. Аварии в кабельных сетях 6 – 10 кВ составляют около 70 % всех нарушений электроснабжения промышленных и бытовых потребителей, и, как правило, сопровождаются значительным экономическим ущербом.

В кабельных сетях 6 – 10 кВ преобладающим видом повреждений и первопричиной большей части аварийных отключений кабельных линий (КЛ) являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Поэтому эксплуатационная надежность указанных сетей, и, следовательно, надежность электроснабжения потребителей, существенно зависит от технического

совершенства средств локации ОЗЗ, обеспечивающих определение поврежденного присоединения и места (зоны) повреждения на КЛ, находящейся под рабочим напряжением.

В [1] показано, что повышение надежности функционирования кабельных сетей 6 – 10 кВ при ОЗЗ возможно только на основе создания и внедрения принципиально новых устройств, обеспечивающих не только селективное определение поврежденного присоединения при всех разновидностях замыканий на землю (устойчивых, дуговых перемежающихся, кратковременных самоустраняющихся), но и их распознавание в целях выбора наиболее эффективного способа действия защиты от данного вида повреждений (сигнал или отключение), а также дистанционное определение места (зоны) ОЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением. Для кабельных сетей 6 – 10 кВ систем городского электроснабжения актуальной задачей является также создание указателей всех разновидностей ОЗЗ, устанавливаемых на ТП и позволяющих селективно определить поврежденных участков на магистральных КЛ.

Разработки, ведущиеся в последние годы в ИГЭУ совместно с НПП «ЭКРА» подтвердили возможность создания на микропроцессорной базе комплексных устройств защиты от ОЗЗ, обладающих всеми указанными выше свойствами [1]. Однако в настоящее время возможности комплексного решения проблемы ОЗЗ не только на центрах питания (ЦП), но и на таких объектах кабельных сетей 6 – 10 кВ как РП и ТП ограничены отсутствием на последних первичных преобразователей напряжения, позволяющих измерять фазные напряжения и напряжение нулевой последовательности. Установка электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН) существующих конструкций на действующих РП и ТП, особенно, городских кабельных сетей, возможна не всегда. Потому актуальной представляется задача создания компактных маломощных первичных преобразователей напряжения 6 – 10 кВ, обеспечивающих возможность их установки в действующих электроустановках и рассчитанных на подключение к ним устройства РЗА и измерений с малым потреблением на микропроцессорной базе.

Исследования, ведущиеся в ИГЭУ, показали перспективность применения для указанной цели маломощных делителей напряжения [2, 3]. Нетрадиционные трансформаторы напряжения на основе резистивных делителей лишены таких недостатков, характерных для электромагнитных ТН, как возможность возникновения феррорезонансных процессов, часто приводящих не только к повреждению самого трансформатора, но и к развитию серьезных аварий; узкий частотный диапазон; неравномерные амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики, препятствующие достоверному определению процентного содержания высших гармоник в кривой первичного напряжения, что необходимо для анализа

качества электроэнергии; невозможность преобразования постоянного напряжения; пожаро- и взрывоопасность и др.

При создании высоковольтных первичных преобразователей напряжения 6 – 10 кВ на основе резистивных делителей напряжения должны быть решены следующие основные задачи:

- 1) обеспечение минимальных габаритов конструкции первичного преобразователя напряжения;
- 2) обеспечение взрыво- и пожаробезопасности конструкции;
- 3) обеспечение достаточной теплопроводности конструкции для отвода тепла от резистивных элементов;
- 4) обеспечение заданного класса точности в заданном частотном диапазоне.

В докладе рассматриваются принципы и основные результаты решения указанных задач.

Библиографический список

1. **Комплексный** подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, Г.А. Филатова [и др.] // Релейщик. – 2015. – Вып. 2. – С. 23 – 29.

2. **Яблоков А.А.** Разработка и исследование первичного преобразователя напряжения измерительного трансформатора для цифровой подстанции 110 – 220 кВ: дисс. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2016. – 237 с.

3. **Lebedev V.D., Yablokov A.A.** Research of the metrological characteristics and voltage transformer with open core antiresonance properties // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, Switzerland, 2015. – № 698. – Pp. 160 – 167.

СЕКЦИЯ 15

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

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

Секретарь – к.т.н., доцент **Сайкин М.С.**

Е.С. Блинова;

рук. Р.Р. Хуснутдинов, к.ф.-м.н., доц.

(КГЭУ, г. Казань)

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ

Прикладные исследования по использованию эффекта сверхпроводимости, достигаемого у сверхпроводящих материалов при температурах ниже критических, ведутся уже на протяжении десятилетий.

Высокотемпературные сверхпроводники можно использовать при изготовлении силовых кабелей, трансформаторов, электрических машин, индуктивных накопителей энергии (с неограниченным сроком ее хранения), ограничителей тока и т.д. В сравнении с установленными они характеризуются уменьшенными потерями и габаритами и обеспечивают повышение эффективности производства, передачи и распределения электроэнергии. Так, сверхпроводящие трансформаторы будут обладать меньшей массой и более низкими потерями, чем трансформаторы той же мощности, имеющие обычные обмотки. Кроме того, сверхпроводящие трансформаторы способны ограничивать ток в случае перегрузки, не нуждаются в минеральном масле, а значит экологичны и не подвержены риску возгорания.

Бурный темп развития работ по высокотемпературной сверхпроводимости, помимо чисто научного интереса, был связан с надеждами на широкое использование этого явления в практических целях. Условно все эти применения можно разделить на два основных направления: криоэнергетика и криоэлектроника.

В криоэнергетике используется свойство сверхпроводников, заключающееся в равенстве нулю электрического сопротивления. Это приводит к тому, что ток через провод из сверхпроводника не сопровождается тепловыми потерями. Однако передача тока по сверхпроводникам хоть и выглядит заманчивым в виду отсутствия потерь, не является энергетически выгодным вариантом, потому как эксплуатация таких линий требует больших затрат. Поэтому сверхпроводники использовались в более компактных схемах. В криоэлектронике используется в основном явление квантования магнитного потока в контуре сверхпроводника и свойства

переходов Джосевсона. В этой области существенный прогресс достигнут в ряде направлений, таких как разработка новых быстродействующих элементов вычислительной техники, создание приборов, регистрирующих электромагнитное излучение, изменение ранее сверхпроводники.

Сверхпроводящие кабели гораздо компактнее, то есть существенно облегчается их прокладка в условиях насыщенной городской / пригородной инфраструктуры. Так же по сверхпроводящим кабелям можно передавать большие мощности при значительно более низком напряжении. Следовательно, уменьшится электромагнитное загрязнение окружающей среды.

Потенциальная выгода от широкого использования явления сверхпроводимости очевидна: радикальное снижение потерь электроэнергии при ее выработке и передаче, уменьшение в разы размеров генерирующего оборудования и двигателей, создание новых электронных приборов, разработка новых направлений в медицине, использование эффекта левитации на железной дороге.

Распространению сверхпроводимости, не в последнюю очередь, способствуют жесткие ограничения на выбросы парниковых газов, установленные Киотским протоколом. Финские ученые подсчитали, что эту задачу можно было бы выполнить при широком применении сверхпроводимости на электростанциях и в системах передачи и распределения энергии, что дало бы возможность снизить количество сжигаемого топлива, не уменьшив выработку электроэнергии. Одним словом, сверхпроводники должны найти свое широкое применение уже в ближайшем будущем и стать неотъемлемой частью мировой промышленности.

Библиографический список

1. Алфеев В.Н. Радиотехника низких температур. – М.: Сов. радио, 1966. – 368 с.
2. Сверхпроводящие кабельные линии связи / Гроднев И.И., Левинов К.Г., Гальперович Д.Я. – Электросвязь, 1974.
3. Наман Н. Миниатюрные сверхпроводящие коаксиальные линии передачи. – ТИИЭР, 1973.
4. <http://www.energyland.info>.

Е.А. Елисеичев, асп.;
рук. А.В. Юдин, д.т.н., проф.
(РГАТУ им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск)

СНИЖЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУЛЬСАЦИЙ В УПРАВЛЯЕМОМ ВЫПРЯМИТЕЛЕ МЕТОДОМ КАНАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Производство искусственных монокристаллов осуществляется в специальных ростовых установках, которые являются энергоемкой систе-

мой. Электроснабжение комплекса может осуществляться от блочно-модульного импульсного источника питания (БМ ИИП) [1]. Основным узлом БМ ИИП является узел AC/DC -преобразователя. Функциональная блок-схема AC/DC -преобразователя представлена на рис. 1 [2].

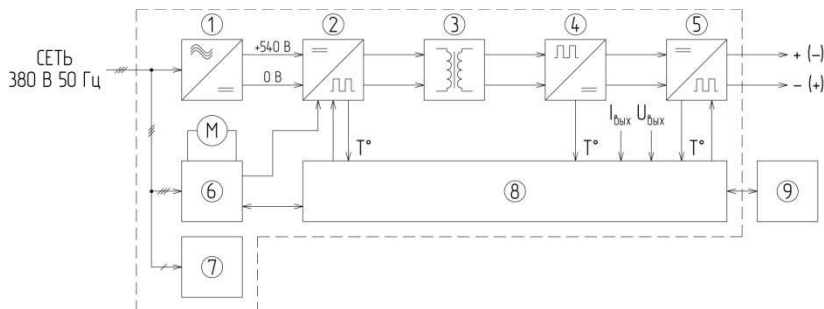


Рис. 1. Функциональная блок-схема AC/DC -преобразователя: 1 – выпрямитель трехфазный; 2 – инвертор с ЧИМ-ШИМ, частотой преобразования 20 – 100 кГц и квазирезонансным режимом переключения; 3 – силовой трансформатор; 4 – выпрямитель вторичный; 5 – мостовая схема (только для блоков с реверсом); 6 – схема анализа сети, управления вентилятором и питания драйверов инвертора; 7 – служебный блок питания вторичных цепей; 8 – система управления; 9 – разъем управления

Нагрузкой роторных установок является вольфрамовый нагреватель. Максимальная электрическая мощность на нем составляет порядка 50 – 60 кВт. При этом важен также и спектральный состав мощности [3]. На выходе вторичного силового выпрямителя оценку спектрального состава можно оценить с помощью коэффициента пульсаций [4].

Целью исследования является подавление коэффициента пульсаций сетевого тока в узле AC/DC -преобразователя – в инверторе с частотно-, широтно-импульсной модуляцией. Уменьшение коэффициента пульсаций реализовано методом оптимальной настройки системы управления силовых ключей, в каждой из фаз выпрямителя. Система управления осуществляет варьирование добавочных величин, которые изменяют сдвиги импульсов тока во времени.

Идея метода канальной коррекции заключается в том, что в каждом канале системы управления добавляется некоторая величина δ_i , которая выполняет смещение по временной оси управляющих импульсов силового ключа так, чтобы коэффициент пульсаций уменьшился. Для определения величины δ_i предложен метод поисковой оптимизации.

Вычисление оптимизирующих величин δ_i производится в среде моделирования *MATLAB*, с помощью встроенной функции *fminsearch*, алгоритм реализации которой построен на методе оптимизации Нелдера–Мида [5, 6].

Библиографический список

1. **Блочно-модульный импульсный источник питания для высокотемпературного нагревателя с функцией контроля паразитных индуктивностей** / А.В. Манин, А.В. Юдин, Е.А. Елисеичев / Манин, А.В., Юдин, А.В., Елисеичев, Е.А. // Вестник РНК СИГРЭ. – 2016. – № 10. – С. 41 – 45.
2. http://www.power2000.ru/desc_sb.html.
3. **Юдин, А.В.** Оценка искривления фронта кристаллизации в расплаве сапфира по спектральному составу мощности нагревателя / А.В. Юдин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева: сб. науч. тр. – 2011. – № 1 (19). – С. 136 – 141.
4. **Гармоники** в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. **Гольдштейн, А.Л.** Оптимизация в среде MATLAB: учеб. пособие / А.Л. Гольдштейн. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 192 с.
6. **Аливер, В.Ю.** Применение метода деформируемого многогранника и пакета MatLab для оптимизации переходных процессов в технических системах / В.Ю. Аливер // Электронное научно-техническое издание «НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ». – 2012. – № 02.

*И.П. Кравцов, П.В. Полоневич, студенты;
рук. Ю.В. Суходолов, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)*

АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Система электроснабжения (СЭС) является неотъемлемой частью автономных источников питания (АИП), без которой их функционирование невозможно. Задача СЭС состоит в бесперебойном обеспечении потребителей электрической энергией требуемыми номиналами и качеством во всех режимах работы.

Оборудование энергетических объектов имеет в своем составе автономные источники электроэнергии содержащие в себе выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и другие потребители, вольт-амперные характеристики которых нелинейны. Наличие таких потребителей приводит к искажению формы потребляемого тока и питающего напряжения. Данные искажения отрицательно влияют на питающую сеть переменного тока, которые выражаются:

- 1) в ухудшении электромагнитной совместимости оборудования;
- 2) в увеличении потерь энергии в системе;
- 3) в повышении вероятности возникновения резонансных явлений в СЭС;
- 4) в нарушении работы специальной вычислительной техники, устройств релейной защиты и автоматики;
- 5) в ускоренном старении изоляции основного электрооборудования.

Искажения приводят к снижению параметров трансформаторов, питающих электронные нагрузки и увеличению действующего значения тока (I) и тепловых потерь (P) при увеличении коэффициента гармонического искажения.

Это приводит к сокращению срока службы оборудования, на пример, при коэффициенте искажения напряжения питания, близком к 10 % сокращение срока службы составляет для однофазных электрических машин 32,5 %, для трёхфазных электрических машин 18 %, для трансформаторов 5 %.

Искажение токов и напряжений приводит к появлению неактивных составляющих мощности, которые могут достигать 30 %. Неактивные составляющие мощности необходимо компенсировать.

В настоящее время ведущие энергетические компании и потребители электроэнергии заинтересованы в разработке способов и средств, позволяющих устранить негативное влияние высших гармоник для обеспечения требуемого качества электроэнергии и устранения взаимного влияния параллельно работающего оборудования со стороны питающей сети, т.е. созданию систем управления процессами генерирования, передачи и распределения электрической энергии.

На сегодняшний день существуют технические возможности разработки систем компенсации мощности высших гармоник, на основе активных фильтров (АФ).

В последние годы заметно увеличение количества публикаций в российской и зарубежной литературе, посвященных активным фильтрам, вопросам автоматического управления и исследованию качества компенсации неактивных составляющих мощности посредством АФ. Однако, вопросы эффективного регулирования АФ и исследования достигаемых регулировочных, фильтрующих и компенсационных свойств с учетом особенностей работы автономных источников питания от СЭС не исследованы.

Система компенсации мощности высших гармоник подключается параллельно системе электроснабжения.

Известно несколько основных способов управления АФ, разработанных в разное время. Все они могут быть представлены как ряд простых действий, выполняемых теми или иными узлами системы управления, и могут быть в конечном итоге сведены к следующему:

- 1) вычисление гармонических составляющих мгновенного тока напряжения сети;
- 2) преобразование полученного тока задания АФ в закон переключения силовых вентилях АФ.

Определение гармонических составляющих мгновенного тока предлагается проводить по выражениям для амплитуд и начальных фаз гармонических составляющих тока, полученных на основе анализа временных параметров кривой тока. Преимуществом данного метода является высо-

кое быстродействие, основанное на одновременном вычислении амплитуд I_n и начальных фаз Ψ_n гармонических составляющих за $1/2$ периода повторения тока и отказ от использования полосовых фильтров.

*И.П. Кравцов, П.В. Полоневич, студенты;
рук. Ю.В. Суходолов, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Наиболее часто встречающиеся методы являются резонансные методы контроля которые применяются для выявления витковых замыканий обмоток. Они основаны на анализе амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик или использовании резонансных эффектов.

Повышение точности контроля основано на использовании резонансного участка частотной характеристики, получающего максимальное изменение при возникновении виткового замыкания и минимальное при отклонении параметров исправной обмотки.

Анализ АЧХ показывает, что наибольшей чувствительности можно достичь, используя частотную область, имеющую частоту на 20 – 30 % ниже частоты максимума.

Чувствительность контроля к одному витковому замыканию будет определяться как относительное увеличение амплитуды сигнала при возникновении дефекта.

Чувствительность не определяет возможность обнаружения виткового замыкания, так как приращение амплитуды фиксируемого сигнала при изменении амплитуды входного из-за нестабильностей может быть воспринято как возникновение дефекта.

Для исключения этого должно соблюдаться соотношение

Витки чаще всего замыкаются через сопротивление, достигающее величины 10 Ом, что характеризуется снижением реакции выходного параметра от таких скрытых дефектов. Ввиду этого для обеспечения достоверности контроля исключается влияние нестабильности амплитуды диагностического сигнала путем анализа состояния обмотки по фазовым соотношениям снимаемых сигналов.

Контроль предусматривает не только обнаружение явных дефектов, о и испытание изоляции, которое проводят с помощью импульсного напряжения. Ввиду этого использование разработанного способа осуществляется путем выделения из снимаемых сигналов соответствующих по частоте спектральных составляющих с максимальной разностью фаз, по величине которой судят о состоянии обмотки.

*К.И. Куликов, студ., К.Е. Пономарев, асп.;
рук. Е.А. Спиридонов, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛИ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В МЕТРОПОЛИТЕНЕ

Тенденции развития электрического транспорта диктуют необходимость эффективного использования электрической энергии. Одним из способов достижения этого является применение рекуперативного торможения, при котором часть выделяемой энергии отдается тяговому потребителю.

Метрополитен – это транспортная система, для которой возможно организовать график движения поездов, удовлетворяющий требованиям максимально эффективного использования энергии рекуперации. Однако, даже для такого высокоорганизованного транспорта невозможно создание условий, при которых вся энергия торможения будет отдана в межпоездной обмен. Определение количества избыточной (невысвоенной) энергии рекуперации – задача, решение которой позволит повысить эффективность функционирования всей системы метрополитена.

На примере Ленинской линии Новосибирского метрополитена проведено исследование, позволяющее оценить количество избыточной энергии рекуперации при разных интервалах движения в течение дня. Для этого разработан программно-вычислительный комплекс на языке Python [2]. Исходными данными для создания алгоритма являются значения функций мощности тяги и торможения, полученные в ходе тягово-энергетических расчетов [1, 4]. В соответствии с ними, а также с учетом длин перегонов и времени хода по ним программа формирует график движения поезда как по маршруту «Заельцовская» – «Площадь Карла Маркса», так и наоборот. При этом время стоянок состава на станциях не зависит от направления, интервала движения поездов и является постоянным. После формирования единичного графика движения происходит его повторение в пределах времени хода по линии через временной интервал, задаваемый пользователем. Дальнейшие функции алгоритма сводятся к подсчету энергии, сопровождающей тягу и торможение, и определению доли эффективно используемой энергии рекуперации, т.е. той, которая может быть передана другому поезду. В соответствии с проводимым исследованием эта информация использована для определения доли избыточной энергии рекуперации, т.е. той, которая выделяется при торможении поездов на линии и не передается тяговому потребителю.

Выявлено, что за период движения поездов с 6.00 – 21.00 доля неэффективно используемой тормозной энергии составляет более 80 %.

Таблица 1. Изменение количества избыточной энергии рекуперации в течение дня

Название параметра \ Время дня, часы	6.00 – 7.00	7.00 – 9.00	9.00 – 17.00	17.00 – 19.00	19.00 – 20.00	20.00 – 21.00
Интервал движения поездов, мин	5	3	5	3,5	4,5	6
Избыточная энергия рекуперации при данном интервале движения за обозначенное время дня, кВт·ч	833,1	2602,6	6664,9	2281,7	918,4	663,1
Доля избыточной энергии рекуперации при данном интервале движения за обозначенное время дня, %	85,8	80,7	85,8	82,2	84,7	87,6

Как видно из табл. 1, доля избыточной энергии рекуперации составляет большую часть всей энергии, вырабатываемой при торможении. Поэтому дальнейшее направление исследования будет связано с решением задачи по эффективному использованию этой энергии. Одним из наиболее вероятных способов достижения этой цели является применение накопителей энергии [3]. Определение месторасположения накопителей, выбор их типа, а также финансово-экономическое обоснование эффективности предлагаемого решения подведут промежуточный итог проводимой работе.

Библиографический список

1. Байрыева Л.С. Теория электрической тяги. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 40 с.
2. Лутц М. Программирование на Python, 4-е издание. Пер. с англ. – Т. II. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 992 с.
3. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с применением накопителей энергии: дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2009. – 372 с.
4. Щуров Н.И. Теория электрической тяги. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 100 с.

Т.Г. Никишкин, студ.;
рук. С.С. Чурсин
(НИ ТПУ, г. Томск)

РАЗРАБОТКА ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОМЕТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ PIN-ДИОДОВ

К настоящему времени в мире создано множество детекторов различных типов, позволяющих регистрировать излучение любой природы. Решение конкретных спектрометрических задач, как правило, требует предельной

оптимизации детектирующих систем. Таким образом, разработка новых спектрометрических решений и оптимизация уже существующих до сих пор являются актуальными направлениями в ядерной измерительной технике.

К созданию новых детекторов чаще всего предъявляются противоречивые требования. Например, необходимо одновременно обеспечить максимальное быстродействие и высокое энергетическое разрешение, либо максимальную эффективность регистрации при минимальном размере и т.д.

Все эти факторы делают актуальной разработку бюджетного переносного спектрометра, обладающего максимально большим возможным разрешением, портативными размерами и минимально возможной стоимостью.

Целью данной работы является разработка и создание портативного низкобюджетного гамма-спектрометра на основе PIN-диодов для скоростного мониторинга и регистрации ядерных материалов и радиоактивных веществ.

При разработке спектрометра гамма-излучения было решено отказаться от использования дорогостоящих полупроводниковых кристаллов и сцинтилляторов в качестве чувствительного элемента спектрометра, и использовать полупроводниковые PIN-диоды.

По результатам проведенных исследований и работ была разработана принципиальная схема спектрометра и собран опытно-конструкторский образец гамма-спектрометра. Тест собранной системы показал работоспособность спектрометра и его реагирование на гамма-излучение.

Библиографический список

1. **Цапенко М.П.** Измерительные информационные системы. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 440 с.
2. **Хоровиц П.,** Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 6-е. – М.: Мир, 2003. – 704 с.
3. **Electronic** equipment repair centre – [Электронный ресурс]: Открытый доступ: <https://electro-medical.blogspot.ru/2015/05/radiation-detector-for-gamma-rays.html>.

*П.В. Полоневич, И.П. Кравцов, студенты;
рук. Ю.В. Суходолов, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Преждевременный отказ электрической машины является аварийной ситуацией, которую необходимо предотвратить или предсказать. Большинство преждевременных отказов асинхронных двигателей происходит из-за повреждений их обмоток, вызываемых механическими воздейст-

виями, имеющими электромагнитную природу, а также тепловыми, климатическими и электрическими нагрузками. Использование способов контроля изоляции, таких как измерение сопротивления изоляции, измерение интенсивности частичных разрядов, измерение емкости относительно корпуса, определение значения тангенса угла диэлектрических потерь, испытание повышенным напряжением, испытание импульсным напряжением, не позволяет добиться высокой достоверности. Также они не учитывают индивидуальные и конструктивные особенностей электрических машин. При диагностике обмоток с помощью анализа затухающих колебаний можно избавиться от вышеописанных недостатков. Однако искажения, вызванные нестабильностью параметров испытательного сигнала, и необходимость подавления неинформативных спектральных составляющих являются недостатком этого способа. Эффективность контроля можно повысить согласуя спектральный состав испытательного сигнала с частотной характеристикой обмотки контролируемой электрической машины. Это необходимо для создания между витками максимальных испытательных напряжений и их равномерного распределения вдоль обмотки. Наибольшей чувствительности контроля можно добиться, если о состоянии обмотки судить по одной или нескольким составляющим сигнала, которые изменяются в большей степени при возникновении дефекта. Это составляющие, соответствующие по частоте резонансной области обмотки. При этом для получения стабильных параметров подаваемого сигнала целесообразно использовать последовательность радиоимпульсов. В таком сигнале полезная информация заключена в одном из нескольких параметров высокочастотного колебания. При этом не обязательно сохранять полностью структуру колебания, достаточно лишь сохранить закон изменения того параметра, в котором заключена информация. При выборе оптимальной формы испытательного напряжения необходимо, чтобы основная энергия его спектра была сосредоточена в диапазоне резонансных частот контролируемой обмотки. При анализе форм спектров различных сигналов можно удостовериться, что наилучшим образом удовлетворяют предъявленным требованиям напряжения в виде отрезков синусоиды, имеющей n периодов:

$$u(t) = \sin(\omega_0 t) \text{ при } 0 \leq t \leq \frac{n}{2\pi} \omega_0,$$

где n определяется по значению $\Delta\omega$ (чем меньше n тем больше значение $\Delta\omega$).

Активную ширину спектра прямоугольного импульса длительностью τ_u можно представить как полосу частот $\Delta\omega$ между значениями, при которых спектральная плотность первый раз обращается в ноль:

$$\frac{(\omega - \omega_0)\tau_u}{2} = \frac{(\omega + \omega_0)\tau_u}{2} = \pi.$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что наибольшее изменение при появлении дефекта получает положение резонансного максимума АЧХ контролируемой обмотки якоря. Это изменение легко фиксируется, если выделять из входного сигнала две близлежащие гармонические составляющие, соответствующие по частоте самому крутому участку АЧХ исправной обмотки. Несущая частота и частота модуляции испытательного сигнала выбираются таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная разность амплитуд выделяемых гармоник. При отсутствии дефекта значение разности амплитуд гармоник максимально и стремится к нулю по мере развития дефектов.

*П.В. Полоневич, И.П. Кравцов, студенты;
рук. Ю.В. Суходолов, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)*

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Обработка сигналов в измерительной технике при контроле электротехнических устройств и параметров питающей сети предусматривает точное измерение временных параметров сигналов в условиях действия помех. Аппаратное повышение чувствительности средств измерения не позволяет решить данную задачу и необходимо совершенствование их алгоритмического обеспечения.

Спектр периодических сигналов обычно значительно уже спектра шумов, следовательно, при помощи соответствующих фильтров можно существенно повысить отношение сигнал/шум. Для прецизионного выделения информативного сигнала форма частотной характеристики оптимального фильтра должна совпадать с формой спектра сигнала. В этом случае отношение сигнал/шум определяется только энергией полезного сигнала на входе фильтра и спектральной плотностью шума, и совершенно не зависит от формы сигнала. Сложность выполнения оптимального фильтра сильно зависит от формы сигнала, а локальные вариации сигнала приводят к искажению его спектра. Кроме того, помехоустойчивость средств измерений зависит и от вида используемых сигналов. В измерительной технике применяется три группы входных сигналов: монохроматические, с дискретным спектром и со сплошным спектром. Использование сигналов со сплошным спектром предусматривает проведение измерений отклонений формы выходного сигнала, что снижает чувствительность контроля и не позволяет автоматизировать измерительный процесс. Особенности обработки таких сигналов не позволяют обеспечить превы-

шение относительного изменения фиксируемого параметра над уровнем шумов, обусловленных неизбежной нестабильностью генерирования зондирующих импульсов.

Изменение значений параметров сигналов приводят к нарушению исходного распределения гармонических составляющих, при котором одни из них подвергаются наибольшим изменениям, а другие – наименьшим. Точность и обеспечение автоматизации контроля основано регистрации характерных гармонических составляющих спектра, обладающих наибольшей чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра и наименьшей чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Целесообразным при этом является применение сигналов с дискретным спектром – импульсных последовательностей. Определив номера характерных гармонических составляющих можно в значительной степени избавиться от помех, обусловленных снижением устойчивости работы измерительной аппаратуры. Для нахождения номеров гармонических составляющих, обладающих минимальной чувствительностью к нестабильности параметров E , τ , T , t_3 импульсной последовательности необходимо исследовать динамические особенности его спектра (анализ частных производных выражений для амплитуд характерных гармонических составляющих).

Предложенный подход открывает возможности совершенствования алгоритмического обеспечения средств измерений с целью повышения их помехоустойчивости.

*А.Н. Серов, ст. преп.;
рук. А.А. Шатохин, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА

Метод измерения спектра на основе ДПФ в настоящее время получил наибольшее распространение. Основная причина возникновения дополнительной погрешности измерения вызвана эффектом «растекания спектра» [1], приводящего к искажению амплитудных и фазовых компонент спектра и появлению ложных компонент. Данный эффект обусловлен девиацией частоты системы электроснабжения. Для устранения «растекания спектра» значение времени измерения должно быть кратно значению периода входного сигнала. При этом могут быть применены аппаратные или программные методы.

Аппаратные методы основаны на использовании генератора с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), который выполняет запуск АЦП. При этом частота дискретизации отслеживает изменения частоты электросети. Главным недостатком данного подхода является наличие дополнительной погрешности вследствие зависимости параметров цифровых фильтров от частоты дискретизации.

Альтернативный метод предполагает сбор цифровых отсчетов сигналов с постоянной частотой дискретизации, которая задается высокостабильным кварцевым генератором. По этой причине частотные характеристики цифровых фильтров остаются постоянными при варьировании частоты электросети. Чтобы устранить «растекание спектра», отфильтрованные отсчеты предварительно обрабатываются цифровым преобразователем частоты дискретизации (ПЧД), алгоритм работы которого реализуется программно. Для управления коэффициентом ПЧД используются периодические измерения частоты с помощью алгоритма, устойчивого к помехам реальных электрических сетей. По измеренному значению частоты напряжения выполняется подстройка частоты дискретизации, что обеспечивает постоянство числа отсчетов. Это позволяет для вычисления ДПФ использовать эффективные алгоритмы БПФ.

Значения дискретного спектра напряжения могут быть получены с помощью прямого ДПФ [1]:

$$\dot{U}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} u[n] e^{-j \frac{2\pi k n}{N}}, \quad (1)$$

где $u[n]$ – n -й дискретный отсчет напряжения; N – число отсчетов.

Для случая синусоидального входного напряжения выражение (1) принимает вид:

$$\dot{U}[k] = -\frac{jU_m}{2} \left[\frac{e^{j\alpha_u} (1 - e^{j\omega N})}{1 - e^{j(\omega - 2\pi k/N)}} - \frac{e^{-j\alpha_u} (1 - e^{-j\omega N})}{1 - e^{-j(\omega + 2\pi k/N)}} \right], \quad (2)$$

где U_m – амплитуда; $\omega = 2\pi f/f_s$ – угловая частота, нормированная к частоте дискретизации f_s ; f – текущая частота; α_u – начальная фаза напряжения.

Пусть на m периодах основной компоненты с частотой f_1 укладывается ровно N отсчетов напряжения. Тогда:

$$f_s = f_1 N / m. \quad (3)$$

При девиации частоты входного сигнала равенство (3) не выполняется, что приводит к отклонению основной компоненты и появлению гармоник, как видно из сравнения зависимостей (2) и (4). Согласно ГОСТ Р 51317.4.30–2008 диапазон измерения частоты f_1 составляет 42,5 – 57,5 Гц. При данных отклонениях частоты входного напряжения от номинального значения относительная погрешность измерения спектра достигает единиц процентов, что исключает возможность прямого применения ДПФ.

Изменяя f_s пропорционально f_1 , можно поддерживать равенство (3). Для этого требуется выполнять измерение частоты f_1 . Однако конечная погрешность измерения f_1 не позволяет точно выполнить равенство (3) и, следовательно, обуславливает некоторое искажение спектра.

Для случая синусоидального напряжения с частотой f_1 погрешности измерения амплитудного спектра основной компоненты и гармоник могут быть выражены в следующем виде:

$$\delta\left(\dot{U}[k]\right)_{k=m} = -\left(0,167 \cdot (\pi m \delta_f)^2 + \left|0,5 \cdot \delta_f\right|\right), \quad (4)$$

$$\left|\dot{U}[k]\right| = 0,5\pi U_m m \delta_f \left(1 / \sin(\pi(k - m) / N) + 1 / \sin(\pi(m + k) / N)\right). \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что погрешность амплитудных значений гармоник линейно зависит от δ_f . Относительная погрешность измерения амплитудного значения основной компоненты содержит два слагаемых: линейно и квадратично зависящих от δ_f . Для снижения влияния квадратичной составляющей необходимо минимизировать погрешность измерения δ_f . Выражения (4) и (5) представляют собой максимальные значения погрешности при произвольном значении начальной фазы входного напряжения.

Библиографический список

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2007. – 752 с.

А.С. Данилов, студ.;
рук. Л.И. Шеманева, к.т.н., доц.
(КГТА им. В.А. Дегтярёва)

СИСТЕМА КОРРЕКТИРОВКИ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ НА ФАЗЫ

При токах свыше 15 А на трансформаторах наблюдается неравномерность распределения нагрузки по фазам, что приводит к перегреву и выходу из строя трансформатора[1]. Следовательно, целью моей работы является создание и расчет схемы, позволяющей уравновесить неравномерность фаз.

Подключение нагрузки на разные фазы, которая всегда отличается и по величине, и по характеру - резистивная и реактивная (индуктивная и емкостная), в питающей сети возникает перекос фазных напряжений. Помимо вреда, который наносит электроэнергия низкого качества непосредственно электроприемникам, возникают уравнивающие токи, вызывающие дополнительный расход электроэнергии, и, соответственно, топлива, масла, охлаждающей жидкости при питании от генератора. Чем

больше уравнительный ток, тем больше потери электроэнергии. Чем больше напряжение смещения, тем выше риск повреждений, отключений, отказов, неустойчивой работы электроприемников, генератора электроэнергии, тем быстрее они изнашиваются, тем больше потребляют ресурсов [2]. Последствия перекоса фаз проявляются в увеличении электропотребления из сети; в неправильной работе электроприемников, их сбоях, отказах, отключениях, перегорании предохранителей, износе изоляции. Для трехфазных автономных источников неравномерность загрузки их фаз чревата механическими повреждениями подшипников валов, подшипниковых щитов генератора и приводного двигателя, закоксовыванию форсунок, следовательно, работа является актуальной [3].

Для решения задачи по устранению перекоса фазных напряжений и обеспечения заданного фазного напряжения необходимо использовать технологию, которая позволит выравнять напряжение не на каждой из фаз по отдельности, а симметрировать фазы между собой, то есть симметрировать всю трехфазную систему. Такое устройство обладает значительно большей эффективностью, оно не только само потребляет меньше электроэнергии, но и снижает электропотребление из сети для электроприемников [4].

На основании анализа существующих схем симметрирования нагрузки, построена и рассчитана схема, почти полностью исключающая недостатки существующих, она представлена на рис 1.

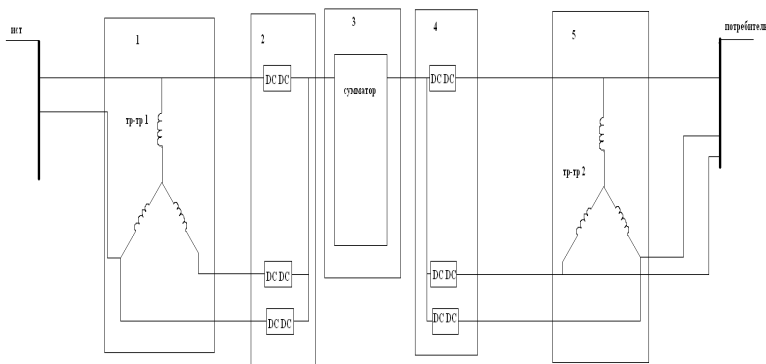


Рис. 1. Общая схема устройства: 1 – трансформатор на который приходит нагрузка R; 2 – МК DCDC позволяющий снизить U для обработки на сумматор; 3 – сумматор вычисляющий U_{cp} , поступающее неравномерное напряжение с трансформатора 1 на трансформатор 2; 4 – МК DCDC позволяющий повысить U для обеспечения требуемой мощности; 5 – трансформатор с выровненной нагрузкой

Библиографический список

1. Федулов В.И. Способ и средства симметрирования нагрузок в электрических сетях сельскохозяйственного назначения: дисс. ... канд. техн. наук. – С. 130.

2. **Костинский С.И.** Снижение потерь электроэнергии в трансформаторах распределительных сетей внутренним симметрированием их нагрузок: дисс. ... канд. техн. наук, 2013. – С. 325.

3. **Дерунов В.А.** Методы и устройства симметрирования напряжений в системах электроснабжения: дисс. ... канд. техн. наук, 2005. – С. 146.

4. **Анализ** схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока / Закарюкин В.П, Крюков А.В.,.. Иванов Е.С // Иркутский государственный университет путей сообщения. – 2013. – № 4 (20). – С. 68 – 73.

А.Е. Лебедев;
рук. С.В. Венедиктов, к.т.н., доц.
(Чебоксарский институт (филиал)
«Московский политехнический университет», г. Чебоксары)

ЭКОНОМИЧНЫЙ ЦИФРОВОЙ АМПЕРМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ БОЛЬШИХ ТОКОВ

Представлен малозатратный способ оценки переменного тока больших значений в проводнике путем его разделения на составные части, измерением тока в одной из частей и автоматической экстраполяцией полученного значения на весь проводник, рассмотрена область применения и дана сравнительная оценка погрешности измерения.

В электрических сетях для измерения значительного по величине переменного тока используют трансформаторы тока различных серий и номиналов. В системах автоматики используются датчики тока.

В работе представлен способ измерения переменного тока в части проводника и далее путем пересчета оценивающий весь протекающий ток. На рис. 1 показан проводник, в котором требуется измерить ток. Это проводник некоторого стандартного сечения – например ЛЭП. С помощью измерительного трансформатора (или токовых клещей) можно замерить значение тока, протекающего в этом проводнике. Но такой метод измерения сложно автоматизировать, и он довольно дорогостоящий. Измерительный трансформатор помимо этого может обладать неподходящими массогабаритными показателями. Предлагается следующий метод измерения значения тока, протекающего в проводнике (фидере).

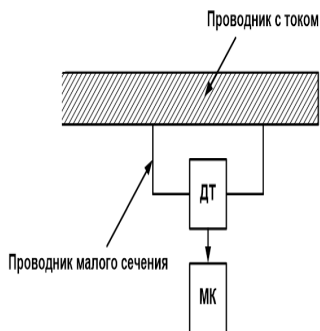


Рис. 1. Проводник, в котором требуется измерить ток

В основной проводник с измеряемым током присоединяется проводник с малым сечением. Соответственно, через него будет протекать ток, пропорциональный измеряемому. При использовании достаточно недорогих (в пределах сотни рублей) аналоговых датчиков тока (на рис. 1 обозначен ДТ) можно получить на выходе датчика аналоговый сигнал, пропорциональный измеряемому току. Примером такого датчика может послужить датчик фирмы LEM.

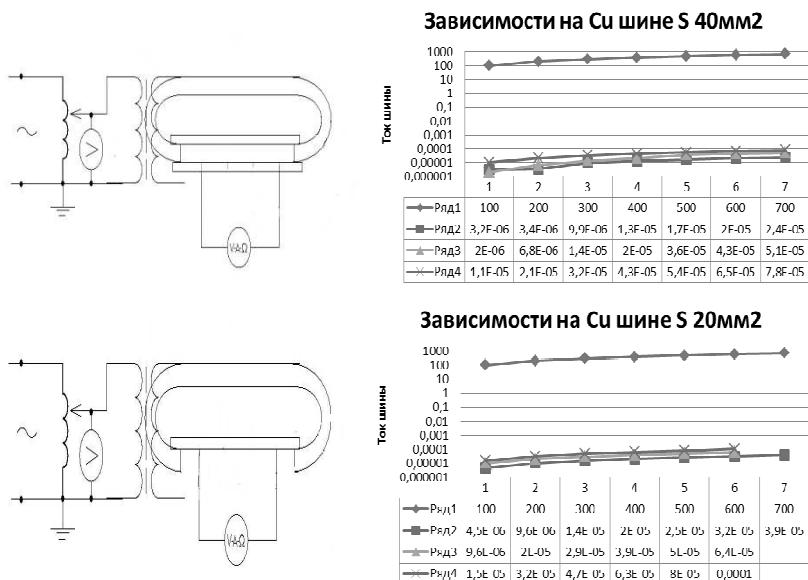


Рис. 2. Внешний вид лабораторного способа измерения переменного тока

Экспериментальные зависимости тока измерительного проводника между контактами при изменении тока в шинах одинарного и сдвоенного сечения носят линейный характер и позволяют оценивать большие токи миниатюрным, недорогим датчиком.

Произведена оценка погрешности измерения тока представленным методом, и в первом приближении она составит не более 8 % от верхнего значения диапазона измерения.

Выводы

1. Представлен способ контроля переменного тока больших значений путем отвода его части через параллельный проводник малого сечения, измерением миниатюрным датчиком на эффекте Холла и перемножением

полученного значения микроконтроллером, позволяющим сократить стоимость процесса оценки тока за счет исключения трансформатора тока.

2. Произведена оценка погрешности измерения тока представленным методом, и в первом приближении она составит не более 8 % от верхнего значения диапазона измерения.

А.Н. Серов, ст. преп.;
рук. А.А. Шатохин, к.т.н., доц.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТУРНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА

В настоящее время для определения спектра напряжения или тока (далее сигнала) наиболее часто используется аппарат дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Известно [1], что точность измерения спектра существенно ограничивает так называемый эффект «растекания спектра». Для снижения проявления этого эффекта применяется подстройка частоты дискретизации f_s под частоту системы электроснабжения. Для подстройки частоты дискретизации в цифровой обработке сигналов используется операция передискретизации, которая реализуется с помощью преобразователя частоты дискретизации (ПЧД), что вызывает дополнительные сложности и поэтому является недостатком.

Помимо метода измерения спектра, основанного на ДПФ, существует альтернативный подход, использующий квадратурную демодуляцию (КД). Данный метод [2, 3, 4] основан на применении квадратурного демодулятора, позволяющего выделять амплитуды и фазы требуемых компонент спектра.

Принцип действия КД основан на последовательном выделении частотных компонент входного сигнала путем его перемножения с ортогональными друг по отношению к другу гармоническими сигналами. Входной сигнал с частотой $\omega_1 = 2\pi f_1$ и опорный сигнал с частотой ω_0 подаются на умножитель. Результирующие сигналы содержат в своем составе низкочастотную (являющуюся полезным сигналом) и высокочастотную (являющуюся помехой) компоненты. Применение ФНЧ позволяет выделить полезный низкочастотный сигнал, пропорциональный значению компоненты комплексного спектра с частотой ω . Погрешность дискретных отсчетов выходного сигнала обусловлена несоответствием частот входного и опорного сигналов и характеристиками используемого ФНЧ. В установившемся режиме выходной сигнал демодулятора для синусоидального сигнала определяется как:

$$y[n] = 0,5X_m \left(H_1 e^{j(\Delta\omega n + \alpha - 0,5\pi + \varphi_1)} - H_2 e^{-j((\omega_1 + \omega_0)n + \alpha + 0,5\pi + \varphi_2)} \right), \quad (1)$$

где H_1 – значение АЧХ фильтра на частоте полезного сигнала ($\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$); φ_1 – значение ФЧХ фильтра на частоте $\Delta\omega$; H_2 – значение АЧХ фильтра на частоте помехи ($\omega_1 + \omega_0$); φ_2 – значение ФЧХ фильтра на частоте $\omega_1 - \omega_0$.

Для подавления высокочастотной составляющей (являющейся помехой) и пропускания низкочастотной составляющей без искажений, АЧХ идеального ФНЧ должна удовлетворять следующим требованиям: $H_1 = 1$ для $\omega \leq \Delta\omega$; $H_2 = 0$ для $\omega > \Delta\omega$.

Амплитудное (X_m) значение комплексного выходного сигнала демодулятора пропорционально соответственно модулю комплексного спектра компоненты входного сигнала с частотой $\omega = \omega_0$:

$$X_m = 2|y[n]|/|H_1|. \quad (2)$$

Конечная неравномерность полосы пропускания ФНЧ приводит к искажению полезной составляющей $y[n]$, а конечное подавление в полосе заграждения – частичному пропусканию помехи. Погрешность, вызванную неравномерностью АЧХ в полосе пропускания можно компенсировать, поскольку значения АЧХ применяемого цифрового фильтра известны в процессе измерения, а текущее значение частоты может быть измерено непосредственно с помощью метода КД. При этом значение относительной погрешности измерения амплитудного значения входного сигнала синусоидальной формы определяется выражением:

$$\delta(X_m) \cong 0,25H_2^2 / H_1 - \cos(2\omega_1 n + 2\alpha + \varphi_1 + \varphi_2)H_2 / H_1. \quad (3)$$

Переменная составляющая ($\cos(2\omega_1 n + 2\alpha + \varphi_1 + \varphi_2)$) погрешности (3), может быть устранена применением адаптивного усреднения (либо низкочастотной фильтрации) сигнала $|y[n]|$ на интервале, кратном периоду помехи. Тогда число усредняемых отчетов может быть вычислено по формуле:

$$L = \text{round}(0,5kf_s / f_1), \quad (4)$$

где $\text{round}(\cdot)$ – операция округления до ближайшего целого; k – натуральное число; f_s – значение частоты дискретизации.

Результаты имитационного математического моделирования показывают, что применение дополнительной фильтрации (адаптивного усреднения) результатов измерений амплитудного значения позволяет обеспечить снижение погрешности измерений данного параметра до $2L$ раз (где L – число усредняемых отчетов результатов измерений).

Библиографический список

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2007. – 752 с.

2. **Antonesei G.** System and method for detecting a fundamental frequency of an electric power system // US Patent No. US 8,907,655 B2, Dec. 9. – 2014.

3. **Antonesei G.** Apparatus and method for real time harmonic spectral analyzer // Pub. No. US 2015/0015239 A1, Dec. 15. – 2015.

4. **Minciunescu P., Antonesei G.** Novel Harmonic Analysis Method Improves Accuracy, Reduces Computation Overhead in Smart Meters// Technical Article MS-2223. – Analog Devices.

С.В. Колчанов, студ.;
рук. Л.И. Шеманева, к.т.н., доц.
(КГТА им. В.А. Дегтярёва)

МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Для обеспечения бесперебойного питания мощных электрических устройств необходимо наличие источника питания постоянного тока, который обеспечивает работу с параметрами: $U = 380$ В, $I =$ до 100 А, $P = 38$ кВт. [1]. Следовательно, целью моей работы является создание и расчет схемы, позволяющей получить на выходе заявленные параметры.

При исследовании существующих источников я вывел следующую структурную схему, представленную на рис. 1.

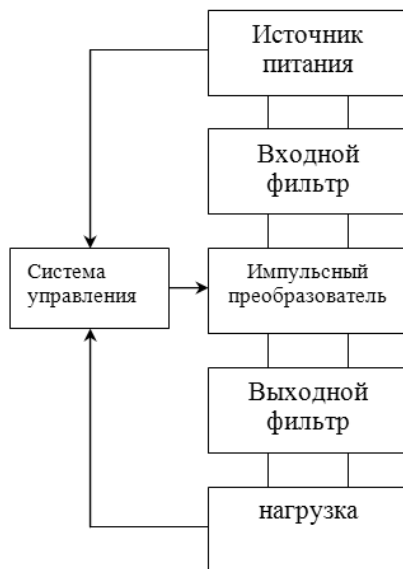


Рис. 1. Структурная схема

В отличие от существующих схем в своей схеме управления я использую IGBT транзисторы, так как они обеспечивают большую выходную мощность сигнала.

Проведенный мною сравнительный анализ схемы управления на мощных тиристорах и на IGBT транзисторах показал экономическую, технологическую и энергетическую эффективность предложенной мною схемы (рис. 2).

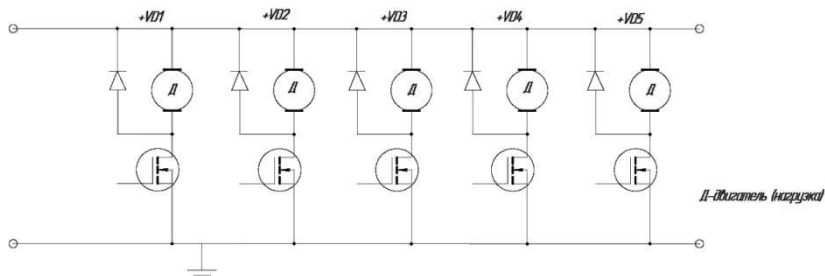


Рис. 2. Схема управления

Библиографический список

1. **Шеманаева Л.И.** Силовая электроника, методическое пособие: для ВУЗов. – Ковров, КГТА, 2016. – 204 с.
2. **Розанов Ю.К.** Силовая электроника : учеб. для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М. : МЭИ, 2007. – 632 с.
3. **Ковалев Ю.З.** Электрооборудование промышленности. Полупроводниковые силовые преобразователи электроэнергии: учеб. пособие / Ю.З. Ковалев, Е.М. Кузнецов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 164 с.

*А.В. Алейников, асп.;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.,
А.Н. Голубев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПО ВИБРАЦИЯМ

В последние десятилетия электроприводы на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами получили широкое распространение. К технико-экономическим показателям таких приводов предъявляются все более жесткие требования, в том числе требование к его виброшумовым характеристикам, вызванным пульсациями электромагнитного момента и радиальных сил, действующих на зубцы статорного кольца и

являющихся основным источником электромагнитных шумов [1]. Развитие современных микропроцессорных средств делают актуальным создание алгоритмов управления электроприводами, обеспечивающих выполнение данных требований.

Разработанные автором математические модели [2], учитывающие реальную геометрию машины и насыщение стали и позволяющие в режиме реального времени вычислять значения электромагнитного момента и радиальных сил, могут быть использованы в качестве наблюдателя состояния. Использование данных математических моделей позволит в каждый момент времени вычислять, какие значения фазных токов необходимы для поддержания электромагнитного момента на заданном значении и снижения разницы между максимальной и минимальной радиальными силами, действующими на зубцы статора. Реализация данной концепции возможна на современных микропроцессорных системах управления, обладающих высокой вычислительной мощностью и позволяющих регулировать мгновенные значения фазных токов в больших пределах.

Проведенные исследования показали, что полностью устранить пульсации радиальной силы посредством системы управления не представляется возможным. Однако предложенный алгоритм позволяет значительно снизить их, сохраняя при этом постоянство заданного электромагнитного момента.

Библиографический список

1. **Голубев А.Н.**, Лапин А.А. Многофазный синхронный регулируемый электропривод / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина». – Иваново, 2008.
2. **Мартьянов В.А.**, Голубев А.Н., Алейников А.В. Математическое моделирование режимов работы многофазных синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 2.

А.О. Большаков, студ.;
рук. М.Г. Марков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Установки индукционного нагрева широко применяются в различных производствах для выплавки и обработки металлов [1]. При этом важно получать достоверную информацию о ходе технологического процесса. Эта задача требует применения современных и высокотехнологических устройств измерения и наглядного представления информации.

Для решения поставленных целей выбран микроконтроллер STM32F407VG, на отладочной плате STM32-discovery. Наличие высокоскоростного АЦП и мощного математического аппарата обусловили выбор данного микроконтроллера [2].

Важной частью работы является написание программного кода для выбранного мною микроконтроллера STM32F407VG. Основные задачи, которые стояли это:

- измерение поступающих сигналов с установки на МК;
- обработка данной информации и ее накопление;
- передача полученных результатов на компьютер, для дальнейшей обработки.

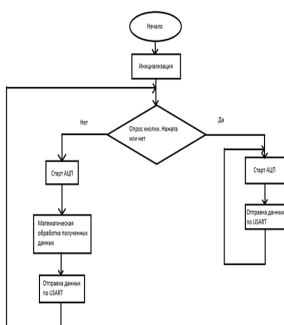


Рис. 1. Блок схема программы

Блок схема представлена на рис. 1.

Из блок схемы видно, что программа работает в двух режимах. 1 режим – стандартный. В этом режиме программа работает по умолчанию. После получения данных микроконтроллер их обрабатывает и только потом передает на компьютер. 2 режим – режим «онлайн». Данный режим позволяет сразу без обработки получать на компьютер значения с АЦП. Активируется нажатием на кнопку.

Другой главной задачей стало преобразование переменного тока и напряжения, в напряжение которое доступно АЦП, а именно в однополярное напряжение от 0 до 3 В. В работе используются для преобразования тока в напряжение шунт и трансформатор тока, а для понижения напряжения сети и гальванической развязки трансформатор напряжения.

Задачу преобразования из двух полярного напряжения в однополярное решил использованием резистивной матрицы и источника опорного напряжения.

Вывод полученной информации на компьютер осуществляется через COM-порт. Однако, современные компьютеры и ноутбуки не имеют выводов COM-порта или же вовсе его лишены. Чтобы устранить эту проблему использована микросхема преобразователь интерфейса USB в интерфейс RS-232, с которым работает COM-порт, CH340.

Найденный модуль работает с номинальным напряжением 5 В, что не подходит для работы с выбранным микроконтроллером. STM32 работает лишь с сигналами от 0 до 3 В, поэтому возникла необходимость добавить преобразователь напряжения из 5 В в 3 В. Таким преобразователем вы-

ступила микросхема K555ЛА3. Схема подключения к компьютеру изображена на рис. 2.

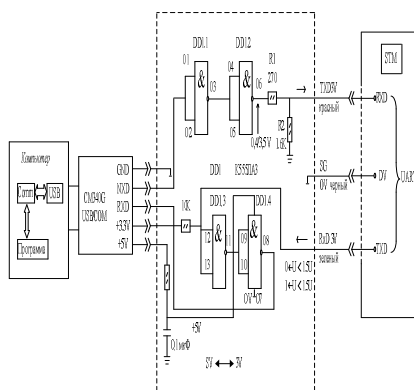


Рис. 2. Схема подключения к компьютеру

K555ЛА3 представляет собой четыре логических элемента 2И-НЕ. Данная микросхема характеризуется тем, что входной сигнал ниже 1,5 В воспринимается как 0, а выше 1,5 В воспринимается как 1 [3]. Из этого следует, что порог входного сигнала хорошо согласуется с сигналами трех вольтовой логики, и сигналы от микроконтроллера STM32F407 с питанием 3 В правильно и адекватно распознается данной микросхемой. Выходной сигнал K555 совместим с уровнем напряжения 5 В. Стоит заметить, что данная схема инвертирует сигнал, поэтому было использовано два инвертора. Инверсия выдает выходной сигнал без инверсии и в результате данная цепочка просто преобразует сигнал в диапазоне от 0 до 3 В в сигнал совместимый с 5 В уровнем преобразователя USB – COM. Для того, чтобы не подключенный вход находился на определенном уровне и не ловил помехи, трехвольтовый выход микросхемы преобразователя, подали на этот вход. В итоге, когда микроконтроллер STM32 не подключен, эта цепочка обеспечивает что на входе микросхемы 3 В.

Программирование происходит на языке Си с использованием программы Keil uvision [4]. На основе проекта можно построить специализированный прибор для измерений параметров технологического режима установок высокочастотного нагрева.

Библиографический список

1. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981.
2. STMicroelectronics User Manual, 2011.
3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – 2001.
4. Кернинган Б., Ритчи Д. Язык программирования Си. – 1978.

А.А. Борисова, студ.;
рук. И.Ю. Долгих, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Термическая обработка изделий из металла является важной технологической операцией, широко используемой в машиностроении. При этом многообразие её видов обусловлено различием в способах нагрева и последующего охлаждения, а также конечной целью её проведения. Так, например, при необходимости получения высокой твёрдости и прочности изделий применяют закалку [1]. В то же время термическая обработка может применяться и как промежуточная операция, конечной целью которой является улучшение условий механической обработки.

При осуществлении термической обработки распространённым процессом является индукционный метод нагрева [2, 3], обеспечивающий быстрый и равномерный ввод мощности в требуемые области изделий на заданную глубину. Однако его применение для конкретных деталей требует тщательного изучения характеристик нагрева с учётом всех особенностей как самого технологического процесса, так и изделия. В этом случае одним из методов является компьютерное моделирование с использованием вычислительных программ, основанных на методе конечных элементов.

Изучение характеристик индукционного нагрева было выполнено на примере стальных валов в пакете Comsol Multiphysics, позволяющим проводить параллельный расчёт цепной задачи, а также электромагнитных и тепловых процессов при достаточной точности учёта особенностей внешнего вида изделия и его физических свойств. Геометрия разработанной модели (рис. 1) построена с учётом симметрии исследуемой системы и включает в себя трёхвитковый внешний индуктор, выполненный из медной водоохлаждаемой трубки, стальное нагреваемое изделие цилиндрической формы и расчётную область, ограниченную с одной стороны линией окружности, а с другой – осью симметрии.

Задаваемым входным параметром модели является величина тока индуктора высокой частоты, при протекании которого в изделии наводятся вихревые токи, являющиеся причиной его нагрева. При этом изменение физических свойств нагреваемого объекта (магнитная проницаемость, удельное электрическое сопротивление, теплопроводность и теплоёмкость) учитывается на основе табличных данных, характеризующих используемый материал.



Рис. 1. Геометрия модели индукционного нагрева

В целом использование указанного программного комплекса позволило определить широкий спектр интересующих характеристик, относящихся как к электромагнитным, так и тепловым процессам индукционного нагрева. В этом случае наибольший интерес представляют картины распределения магнитной индукции в расчётной области, а также плотности тока в изделии и связанного с ним тепловыделения, которые определяют характер его нагрева. В то же время возможность варьирования задаваемых исходных параметров модели и определения численных значений энергетических и технологических параметров процесса позволяет оптимизировать исследуемую технологическую операцию по интересующим целевым функциям.

Библиографический список

1. **Зуев, В.М.** Термическая обработка металлов: учеб. для проф. учеб. заведений / В.М. Зуев. – 5-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2001. – 288 с.
2. **Теоретические основы и аспекты электротехнологий.** Физические принципы и реализация. Интенсивный курс. Основы I. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 359 с.
3. **Слухоцкий А.Е.** Установки индукционного нагрева: Учеб. пос. для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, Бамунэр А.В. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 328 с.

Т.М. Виноградова, студ.;
рук. М.Г. Марков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА ТОКА НА БАЗЕ ПОЯСА РОГОВСКОГО

Перспективным датчиком тока для электроэнергетических установок является трансформатор с воздушным сердечником, именуемый в литературе поясом Роговского. В отличие от классических трансформаторов

тока с ферромагнитным сердечником он не имеет погрешностей, связанных с насыщением магнитопровода. Поскольку напряжение на выходе катушки Роговского пропорционально производной тока, необходимо использовать интегратор для преобразования сигнала. Ранее в работе [1] были исследованы погрешности такого датчика тока на математической модели, и было показано, что можно обеспечить высокую точность измерений за счет правильного выбора параметров основных элементов и усложнения схемы интегратора. Однако, сложные схемы нуждаются в настройке, а требования к элементам оказываются весьма высокими. В данной работе представлены результаты разработки датчика тока с микропроцессорным управлением, свободного от названных выше недостатков.

Для разработки и тестирования программного обеспечения микроконтроллера использована среда разработки MPLAB фирмы Microchip. Исследование погрешностей для переменного синусоидального тока проведено на модели в программе Mathcad и на физической модели.

В ходе исследования разработаны алгоритмы управления датчиком тока, обеспечивающие снижение смещения нуля и малую фазовую погрешность. Работоспособность разработанной по этим алгоритмам программы подтверждена на моделях в средах MPLAB, Proteus, Mathcad и в реальной схеме. Исследования подтвердили возможность повышения точности датчика за счет использования в нем управляющего микроконтроллера. Разработка выполнена на микроконтроллере PIC12F1822, в нем использован АЦП и ШИМ.

Проведенные исследования показали, что для датчика тока на основе пояса Роговского и электронного интегратора можно снизить требования к элементам схемы и повысить точность измерений за счет введения в состав датчика управляющего микроконтроллера.

Библиографический список

1. **Виноградова Т.М.** Разработка и исследование датчика тока для цифрового трансформатора тока // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 22-я Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 25 – 26 февраля 2016 г. – Т. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016.

О.В. Демиденко, асп.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.,
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА

После заправки магнитной жидкости (МЖ) в рабочий зазор магнито-жидкостного герметизатора (МЖГ) происходит перераспределением её

начальной концентрации по объёму МЖ. Оценку величины этого перераспределения можно провести по степени возрастания перепада давлений Δp .

Чем больше градиент магнитного поля в зазоре МЖГ, который для индукции может достигать $\nabla B = 1000$ Тл/м, тем сильнее перераспределение концентрации частиц по объёму МЖ. Чем меньше перераспределение МЖ в неоднородном магнитном поле герметизатора с течением времени, тем выше её стабильность, а значит и постоянство эксплуатационных характеристик МЖГ, а именно критического перепада давлений, моментов трения (установившегося и страгивания).

Стабильность МЖ оценивалась на экспериментальном стенде, состоящем из однозубцового и защитного герметизаторов. Однозубцовый герметизатор выполнен в форме прямоугольной трапеции с углом при основании 45° , шагом 3 мм и величиной площадки 0,2 – 0,3 мм. Рабочий зазор составлял 0,15 мм. Максимальная индукция в рабочем зазоре 1,7 Тл, а средний градиент $\nabla B = 500$ Тл/м. Объём заправки МЖ $0,25 \cdot 10^{-4}$ м³. Скорость вращения вала 0,035 м/с, при диаметре 0,02 м. Сталь магнитопровода имеет индукцию магнитного насыщения 2,1 Тл при напряжённости 50 кА/м. Защитный МЖГ рассчитан на критический перепад давлений $2 \cdot 10^5$ Па.

Экспериментальные исследования по определению критического перепада давлений однозубцового МЖГ проводились в следующей последовательности: под зубец заправлялась МЖ в объёме 0,25 см³. Вал вращался со скоростью 76 об/мин и через 5 минут проводился пробой МЖГ, величина которого фиксировалась по манометру.

Аналогичные испытания проводились через 1, 3 и 11 суток. С течением времени наблюдалось увеличение критического перепада давлений однозубцового МЖГ. Число параллельных экспериментов было равно 3. Обработка результатов эксперимента проводилась при равномерном дублировании. Длительные испытания стабильности МЖ проводились в течение 360 суток. Стабильность свойств МЖ определялась по изменению критического перепада давлений однозубцового уплотнителя. При краткосрочных испытаниях увеличение перепада давлений составило 10 %, а при длительных испытаниях изменений не наблюдалось.

*Е.С. Зайцев, ст. преп.;
рук. В.Д. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ КОАКСИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ШУНТА МЕТОДОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

В настоящее время в электроэнергетике ведутся работы по созданию и внедрению цифрового измерительного оборудования на подстанциях.

Поэтому стало возможным использование измерительных шунтов для определения тока в высоковольтных линиях электропередачи. Это обусловлено тем, что в таком случае есть возможность передачи цифровых данных по оптоволоконному каналу на любое расстояние от высокого потенциала [1]. Преобразование тока в напряжение является самым надежным, простым и пригодным для решения широкого круга задач способом измерения тока [2]. Поэтому шунты весьма перспективны для измерений токов в электроэнергетических системах.

При изготовлении шунта требуется произвести соединение токовых контактов, выполненных из меди, с резистивными пластинами, выполненными из марганца или константана. Соединение должно быть прочным, однородным, иметь минимальное сопротивление. Основной резистивный элемент конструкции после соединения должен сохранить свои механические и электрические свойства. В конструкции не должно быть внутренних механических напряжений.

Наиболее подходящим способом соединения является высокотемпературная пайка серебряным припоем, так как она обеспечивает надёжное соединение элементов конструкции и равномерный шов с малым сопротивлением. Разогрев места стыка удобнее всего производить индукционным методом, поскольку такой метод позволяет выполнить равномерный местный нагрев за короткое время до необходимой температуры. При этом можно контролировать процесс нагрева.

Ввиду того, что токовые контакты имеют разную форму, для пайки необходимо подобрать оптимальную конструкцию двух индукторов для обоих контактов. Критериями выбора их конструкций являются время и температура нагрева. Место стыка необходимо разогреть до температуры 700 – 800 °С в течение 90 с. Таким образом, шунт необходимо паять за два захода.

Конструкции индукторов подбирались с помощью полевых моделей в программе COMSOL Multiphysics. В результате были выбраны цилиндрические индукторы разного диаметра, состоящие из трёх круговых витков. На рис. 1 представлены графики нагрева стыков резистивных пластин с токовыми контактами (фланцы 1 и 2).

На основе выбранных конструкций индукторов были изготовлены их экспериментальные образцы и выполнена пайка измерительного шунта с марганцевыми пластинами. При этом использовался припой ПСР-15. В качестве флюса использовалась бура. Для сопоставления результатов расчёта математических моделей с экспериментами в таблице 1 приведены значения температур нагрева ($T_{\text{эсп}}$, $T_{\text{расч}}$), времени нагрева (t) и относительной погрешности расчётов (δ).

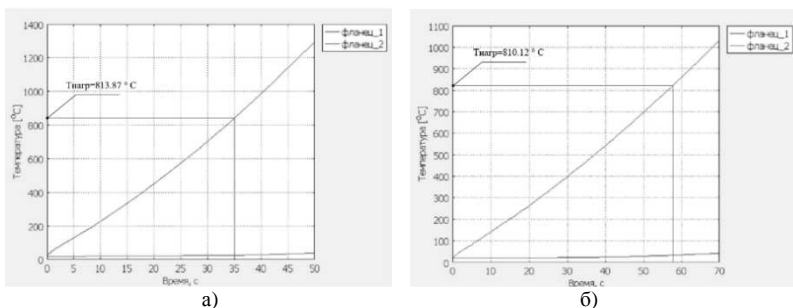


Рис. 1. Графики нагрева стыков резистивных пластин с фланцем 1 (а) и с фланцем 2 (б)

Таблица 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

№ эксперимента	$T_{\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{расч}}, ^\circ\text{C}$	t, c	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
1	839	813.87	35	25,13	2.99
2	834	810.12	57	23,88	2.86

По данным табл. 1 видно, что относительные погрешности расчётов не превышают 5 %. Максимальная погрешность составила 3 % во втором эксперименте, отклонение расчётной температуры при этом составило 25 °С. Погрешности расчётов обусловлены отклонением в размерах и симметрии расположения индукторов, а также нелинейностью тепловых параметров материалов. Тем не менее, модель можно считать адекватной, так как погрешности не выходят за пятипроцентный предел.

Библиографический список

1. Слышалов В.К. Математическое моделирование электромагнитного поля коаксиального измерительного шунта / В.К. Слышалов, В.Н. Гречухин // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 54 – 61.
2. Рыжов Д.В. Определение параметров коаксиального шунта / Д.В. Рыжов, С.А. Самаринский, В.Д. Лебедев // Энергия 2010: материалы регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 6 т. – Иваново: ИГЭУ, 2010. – Т. 3. – С. 144 – 145.

Я.В. Зуйкова, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА УСТАНОВКИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

При использовании диффузионной сварки в вакууме, требуется надежная герметизация штока, который обеспечивает требуемое давление

деталей при создании неразъёмных соединений. Диффузионная сварка проводится при температурах 800 – 900 °С в вакууме 10^{-3} мм. рт. ст.

Для выполнения задачи надёжной и эффективной герметизации штока предлагается использовать магнитожидкостный герметизатор (МЖГ). Для проведения исследований выбран МЖГ с диаметром штока – 80 мм. Размеры зубцовой области герметизатора следующие: величина рабочего зазора $\delta = 0,2$ (мм); величина шага зубца $b = 3$ (мм); величина площадки при основании зубца $t = 0,3$ (мм); зубец выполнен в форме прямоугольной трапеции с углом при основании $\alpha = 45^\circ$ с числом зубцов на полюсной приставке $N = 4$.

В качестве магнитов использовались самарий-кобальтовые магниты в виде пластин с величиной остаточной индукции $B_r = 0,77$ Тл и коэрцитивной силы $H_c = 540$ кА/м. Пластины имели следующие размеры: 15x12x3 (мм), 15x12x5 (мм), 15x12x6 (мм). Магниты укладывались равномерно и своими торцевыми поверхностями примыкали к полюсам МЖГ. Намагниченность магнитной жидкости составляла $M_s = 20$ кА/м. Исследовалось два материала магнитопровода МЖГ: Сталь 10 с индукцией магнитного насыщения: $B_s = 2,11$ Тл и Сталь 20Х13 с индукцией магнитного насыщения $B_s = 1,78$ Тл. Для обеих сталей индукции насыщения достигается при напряжённости магнитного поля $H_c = 50$ кА/м.

Расчет проводится в средах FEMM и COMSOL Multiphysics для плоско-меридианного поля при выполнении граничных условий Дирихле-Неймана. Результаты расчетов сведены в таблицы 1 и 2.

Критический перепад давлений единичного зубца определялся по зависимости:

$$\Delta P_i = M_s \cdot (B_{\max} - B_{\min}),$$

где M_s – намагниченность насыщения магнитной жидкости; B_{\max} и B_{\min} – максимальная и минимальная индукции под зубцом.

Таблица 1. Влияние размеров магнитов на перепад давлений МЖГ (материал магнитопровода – Сталь 20Х13)

Перепады давлений единичных зубцов	Размеры магнита					
	15x12x3		15x12x5		15x12x6	
	FEMM	COMSOL	FEMM	COMSOL	FEMM	COMSOL
1	0,156	0,1544	0,1654	0,1748	0,1678	0,1814
2	0,1566	0,1554	0,1672	0,1776	0,1698	0,1786
3	0,1562	0,1586	0,1672	0,18	0,17	0,1744
4	0,1574	0,158	0,1668	0,1778	0,1696	0,1848
5	0,1556	0,155	0,164	0,1826	0,168	0,2094
6	0,1578	0,158	0,1692	0,1784	0,1704	0,1864
7	0,1564	0,1576	0,1666	0,1764	0,1696	0,1818
8	0,1558	0,1738	0,1666	0,197	0,1712	0,207
Суммарный перепад давлений МЖГ	1,2518	1,2708	1,333	1,444	1,3564	1,5038

Таблица 2. Влияние размеров магнитов на перепад давлений МЖГ (материал магнитопровода – Сталь 10).

Перепады давлений единичных зубцов	Размеры магнита					
	15x12x3		15x12x5		15x12x6	
	FEMM	COMSOL	FEMM	COMSOL	FEMM	COMSOL
1	0,1746	0,158	0,1876	0,1786	0,1902	0,1876
2	0,1746	0,1598	0,1882	0,181	0,1908	0,1882
3	0,1736	0,1618	0,1886	0,1834	0,1912	0,225
4	0,1732	0,1596	0,1862	0,1792	0,189	0,187
5	0,1724	0,156	0,1846	0,1838	0,1886	0,2104
6	0,1748	0,1604	0,19	0,181	0,1638	0,1892
7	0,1744	0,1614	0,1878	0,1798	0,1924	0,1858
8	0,1742	0,1788	0,1882	0,203	0,1926	0,2096
Суммарный перепад давлений МЖГ	1,3918	1,2958	1,5012	1,4698	1,4986	1,5828

Анализ результатов расчёта показывает, что величина погрешности при вычислении критического перепада давлений МЖГ в средах FEMM и COMSOL составляет не более 10 %. Рекомендации по применению одной из этих сред для расчёта МЖГ может быть сделана после проведения экспериментальной проверки.

Критический перепад давлений МЖГ при использовании стали 10 в качестве материала магнитопровода выше, чем при использовании стали 20X13 на 9 – 13 % при сравнении полученных результатов расчёта в одной и той же среде. Сравнение этих сталей показывает целесообразность применения стали 10 для магнитопровода МЖГ, что обеспечивает большую величину критического перепада давлений герметизатора. Применение стали марки 20X13 целесообразно при использовании МЖГ для герметизации агрессивных сред, т.к. она имеет первый балл по коррозионной стойкости.

Ф.А. Кукушкин, студ.;
рук. К.В. Куликов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНВЕРТОРНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ

Инверторные источники питания в настоящее время являются одними из самых распространенных в области сварочных устройств малой и средней мощности. Их производство составляет более 65 % от общего числа выпускаемых устройств.

Проектирование такого рода источников является многокритериальной задачей с выбором многих исходных параметров. Одним из важнейших параметров, определяющих качественные показатели является рабочая частота f_p . Корректный выбор значения рабочей частоты влияет

на резонансные явления внутри источника, перегревы его узлов и, как следствие, на к.п.д. в целом.

В настоящей работе приведены результаты комплексного исследования инверторного источника при изменении f_p в широких пределах.

Результаты исследований приведены на рис. 1 и 2.

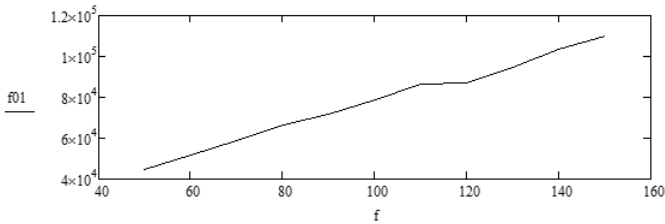


Рис. 1. Зависимость первой гармоники резонансной частоты от рабочей частоты инвертора

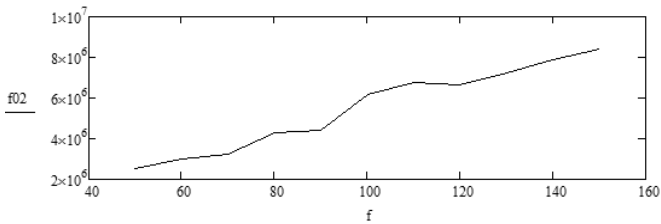


Рис. 2. Зависимость второй и третьей гармоник резонансной частоты от рабочей частоты инвертора

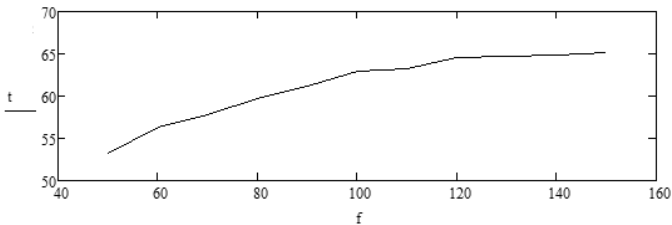


Рис. 3. Зависимость температуры перегрева трансформатора от рабочей частоты инвертора

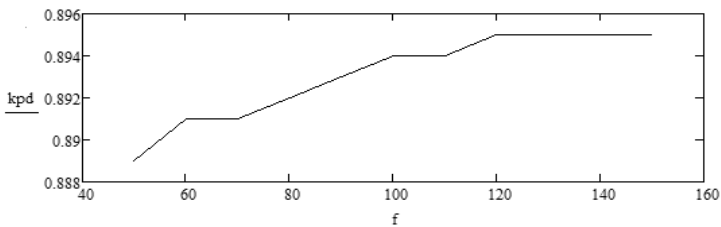


Рис. 4. Зависимость к.п.д. источника от рабочей частоты инвертора

На рис. 1 и 2 показаны нижняя и верхняя резонансные частоты трансформатора при частотах от 50 до 150 кГц.

На рис. 3 представлена предполагаемая температура перегрева (в градусах Цельсия) трансформатора при частотах от 50 до 150 кГц.

На рис. 4 приведен график КПД (в процентах) источника вторичного электропитания при частотах от 50 до 150 кГц.

Проведенные исследования показывают, что при увеличении частоты, резонансные частоты уходят в области не рабочих частот, происходит некоторое увеличение КПД, но вместе с тем растет температура трансформатора и при частоте 150 кГц температура перегрева достигает критического значения.

Это говорит о том, что применение феррита марки М2000НМ1-А на более высоких частотах не целесообразно.

Библиографический список

1. **Эраносян С.А.** Сетевые блоки питания с высокочастотными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат., 1991.
2. **Самсонов В.А.** Исследования влияния рабочей частоты на потери мощности в инверторных источниках питания // Тинчуриные чтения. – КГЭУ, 2016.

*Д.Ю. Лагуткина, асп.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ УГЛА НАКЛОНА С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В основе работы магнитожидкостного датчика угла наклона (МЖДУН) лежит подвес чувствительного элемента в магнитной жидкости. За последние пять лет разработано 6 конструктивных схем магнитожидкостных датчиков угла наклона. Основные тенденции, которые учитывались при разработке МЖДУН, состояли в следующем:

- снижение массогабаритных параметров датчиков;
- повышение быстродействия датчика;
- повышение чувствительности и точности выходных параметров;
- увеличение ресурса и надёжности работы;
- повышение стабильности выходных параметров в течение всего срока эксплуатации датчиков.

Снижение массогабаритных параметров датчиков важно при работе в электротехнических комплексах летательных аппаратов. Это достигает-

ся применением высококоэрцитивных постоянных магнитов [1] из сплавов самарий-кобальт и неодим-железо-бор. Кроме этого необходимо выбрать такие «закритические» сплавы, которые имеют наименьшее значение температурного коэффициента по индукции.

Для повышения быстродействия датчика, была предложена конструкция чувствительного элемента, состоящая из двух кольцевых магнитов и магнитопроводной втулки со сквозным отверстием [2]. Это позволило уменьшить сопротивление движению чувствительного элемента за счёт отсутствия перепада давлений в датчике при изменении его угла наклона. С аналогичной целью разработана конструкция МЖДУН, в которой чувствительный элемент расположен на внешней поверхности корпуса, а МЖ находится в зазоре между внешней поверхностью корпуса и внутренней цилиндрической поверхностью постоянных магнитов чувствительного элемента. Первичная и вторичная измерительные обмотки датчика закреплены в немагнитопроводных втулках, установленных в корпусе [3]. В этой конструкции сопротивление движению чувствительного элемента минимально. Особенность разработанной конструкции заключается в удобстве заправки датчика магнитной жидкостью без его разборки.

Задача повышения чувствительности и точности выходных параметров датчика может быть решена применением конструкции с дополнительным полым стержнем из немагнитного материала. Он проходит вдоль внутреннего объёма корпуса, и образует дополнительный зазор с внутренней поверхностью кольцевых постоянных магнитов, заполненный магнитной жидкостью [4]. С этой же целью разработана конструкция датчика, в которой магнитопроводная втулка со сквозным отверстием имеет выточки, выполненные с наружной или внутренней цилиндрической поверхности, либо с её обеих сторон, причём выточки выполнены на некотором расстоянии от торцевых поверхностей втулки, прилегающих к постоянным магнитам. Это позволяет уменьшить массу чувствительного элемента и обеспечить соосность центрирующих и постоянных магнитов [5].

В неоднородном магнитном поле датчика МЖ перераспределяется, что приводит к снижению стабильности выходных параметров МЖДУН, снижению ресурса и надёжности их работы. Эта проблема может быть решена применением конструкции, в которой чувствительный элемент помещён в цилиндрическую втулку из немагнитопроводного материала [6]. Это снижает перераспределением магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле, возникающем на рёбрах магнитов чувствительного элемента.

В работе разработаны конструкции МЖДУН, обладающие улучшенными эксплуатационными характеристиками для решения различных технических задач.

Библиографический список

1. **Магнитожидкостные** датчики угла наклона для летательных аппаратов / Д.Ю. Морозова, М.С. Сайкин // Вестник РГАТУ им П.А. Соловьева. – 2015. – № 2 (33) – С. 109 – 114.
2. **Сайкин М.С.**, Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 113349, МКИ G01C 9/00, Приоритет от 18.10.2011, опубл. 10.02.2012, Бюл. N 4.
3. **Сайкин М.С.**, Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 126451, МКИ G01C 9/00, Приоритет от 20.03.2012, опубл. 27.03.2013, Бюл. N 9.
4. **Сайкин М.С.**, Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 128318, МКИ G01C 9/20, Приоритет от 06.12.2012, опубл. 20.05.2013, Бюл. N 14.
5. **Сайкин М.С.**, Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 158774 U1, МКИ G01C 9/00, Приоритет от 27.05.2015, опубл. 20.01.2016, Бюл. N 2.
6. **Сайкин М.С.**, Морозова Д.Ю. Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона. Патент на полезную модель, Российская Федерация N 166054 U1, МПК G01C 9/20, Приоритет от 24.05.2016, опубл. 10.11.2016, Бюл. N 31.

Л.С. Майорова, студ.;
рук. К.В. Куликов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТЬЮ,
СОВМЕСТИМЫХ С СЕТЬЮ**

При использовании тиристорных преобразователей (ТП) со схемами управления, допускающими большие скачки тока в момент включения ТП, из-за наличия в сети распределительных индуктивностей и емкостей возникают большие помехи. ТП создают помехи главным образом при включении, так как отключение обычно происходит при нулевом токе. С другой стороны, ТП переключаются чаще и быстрее, что вызывает высокий уровень помех при их работе.

Вышеперечисленное относится к проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС). Поэтому перспективным направлением обеспечения допустимого уровня помех и ЭМС в сети является разработка математических моделей тиристорных преобразователей с возможностью усовершенствования управления ими.

При разработке математической модели тиристорных преобразователей использовался программный комплекс MathCAD. Методом исследования при выполнении экспериментальной части являлось математическое моделирование. Исходными данными являлись схема простейшей сети и схема тиристорного преобразователя с заданной нагрузкой.

По итогам проведенной работы, можно сделать вывод, что источниками электрических и электромагнитных помех могут быть различные узлы тиристорного преобразователя. Для предварительной оценки их свойств самым эффективным способом является компьютерное моделирование.

Чтобы сосредоточить внимание на распространении помех и сохранении качества электроэнергии в энергосистемах, а также создавать устойчивые к искажениям системы управления преобразователями, необходимы специальные комплексы для создания математических моделей тиристорных преобразователей с возможностью подключения в сеть и дальнейшего выявления и устранения помех.

Библиографический список

1. Эраносян, С. А. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. / С. А. Эраносян, В. Ланцов // Силовая электроника. – 2007.

С.Л. Сафонов, студ.;
рук. Е.С. Зайцев, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИНДУКТОРА ДЛЯ ПАЙКИ КООКСИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ШУНТА

При разработке и изготовлении цифровых трансформаторов тока одной из актуальных задач является разработка технологии спайки коаксиального измерительного шунта, который является одним из основных измерительных органов трансформатора. Для спайки такого шунта были изготовлены два индуктора, необходимые для разогрева разных по форме токовых контактов. Конструкции этих индукторов обладают следующими недостатками:

1) После спайки первого фланца шунта необходимо производить замену индуктора и подставки под шунт. На это тратится дополнительное время, и расходуется эксплуатационный ресурс оборудования.

2) Для эффективного нагрева, шунт требуется располагать так, чтобы фланец находился в середине индуктора на уровне среднего кольца. При этом одно из колец будет находиться на уровне резистивных пластин. Это приведёт к тому, что в пластинах возникнет значительное неоднородное электромагнитное поле, которое индуцирует большие токи Фуко. В результате может произойти прогорание резистивных пластин, выполненных из манганина, так как его температура плавления на 120 градусов ниже температуры плавления меди (960 °С). Такой эффект произошёл во время выполнения одного из экспериментов, в результате чего шунт был испорчен.

3) Во время подачи тока происходит отклонение индуктора от исходного положения, в результате чего нагрев происходит нестабильно и эффективность нагрева снижается из-за изменения расстояний между индуктором и разогреваемой заготовкой.

Поэтому было предложено разработать универсальный плоский индуктор, с помощью которого можно будет разогревать оба токовых контакта. При этом разогрев резистивных пластин должен происходить за счёт теплопередачи. То есть токи Фуко должны индуцироваться только в медных фланцах (токовых контактах).

Плоская конструкция индуктора позволит разместить его между разогреваемым шунтом и подставкой. Таким образом будет исключено отклонение при подаче тока. Однако здесь возникает другая проблема: необходимо обеспечить тонкую теплоизоляцию между шунтом и индуктором. В первом приближении для теплоизоляции предложено использовать керамическую плитку и картон.

Разработку конструкции универсального индуктора можно выполнить с помощью полевых моделей в программе COMSOL Multiphysics, так как в этой программе есть возможность соединять массивные проводники, находящиеся в электромагнитном поле, в электрическую цепь [1]. Благодаря этому можно задать одинаковый ток во всех витках индуктора.

На рис. 1 представлены графики нагрева стыков резистивных пластин с фланцами № 1 и № 2, полученные при расчёте одного из вариантов конструкции универсального индуктора.

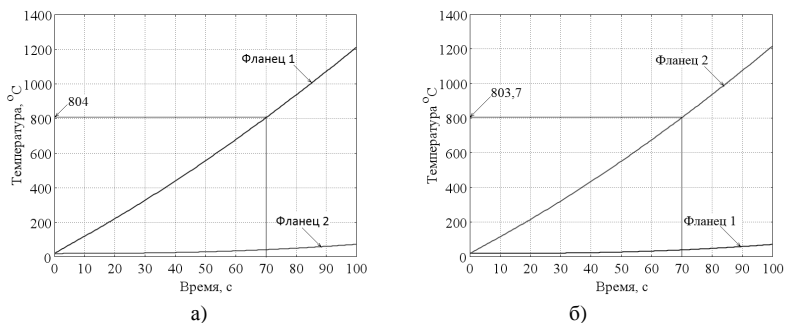


Рис. 1. Графики нагрева стыков резистивных пластин с фланцем 1 (а) и с фланцем 2 (б)

По рисункам видно, что стык с верхним фланцем (№ 1) нагревается до температуры 804 °C за 70 с, а стык с нижним фланцем (№ 2) – до температуры 803,7 °C. При этом поверхность картона прогрелась только до 295 °C в первом случае, и до 225 °C во втором, что является приемлемым, так как бумага воспламеняется при температуре 450 °C.

Такая конструкция индуктора позволит упростить процесс пайки шунта, обеспечит плавный нагрев медных фланцев и снизит вероятность расплавления манганиновых пластин.

Библиографический список

1. **Лебедев В.Д.** Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков; Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – Иваново, 2013. – 328 с.

Ю.О. Шапина, студ.;
рук. И.Ю. Долгих, ст. преп.,
Л.Б. Корюкин, инж.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ВАРИАЦИИ ПЛОСКОГО ИНДУКТОРА

Повышение технологических и энергетических показателей процесса изготовления изделий из металла требует совершенствования способов его осуществления.

Среди широкого многообразия методов изготовления металлоконструкций можно выделить индукционную сварку, достоинство которой заключается в возможности внесения требуемого количества тепловой энергии в заданную область изделий, что в конечном итоге способствует получению неразъёмного соединения с заданными прочностными и качественными характеристиками. В зависимости от используемой технологии на практике нашли применение цилиндрические и плоские индукторы с различными конструктивными параметрами. При этом в области стыковой сварки актуальным является применение плоских индукторов [1], позволяющих нагревать поверхности частей изделий, участвующие непосредственно в образовании сварного соединения. Однако перспективность их использования в конкретных технологических процессах связана с решением ряда технических задач, одной из которых является исследование влияния конструкции индуктора на характеристики индукционного нагрева и, как следствие, качества готовой продукции.

Наиболее перспективным методом решения указанной задачи является компьютерное моделирование исследуемого процесса, позволяющего получать широкий спектр интересных характеристик при возможности изменения исследуемого параметра. Данным требованиям соответствует, например, программа Comsol Multiphysics, в основе которой лежит метод конечных элементов.

Конструктивный чертёж индукционного нагрева (рис. 1) включает в себя индуктор, выполненный из медной шины и располагаемый между двумя частями нагреваемого стального изделия. Исследования проводились при различных соотношениях высот индуктора $h_{\text{инд}}$ и изделия $h_{\text{изд}}$. на основе анализа кривых, характеризующих распределение индукции, плотности тока и тепловыделения на выделенных участках горизонтальных и вертикальных осей (X, X_1, X_2, Y, Y_1, Y_2).

На рис. 2 представлены кривые, характеризующие распределение плотности тока по поверхности изделия при различных вариантах указанного соотношения.

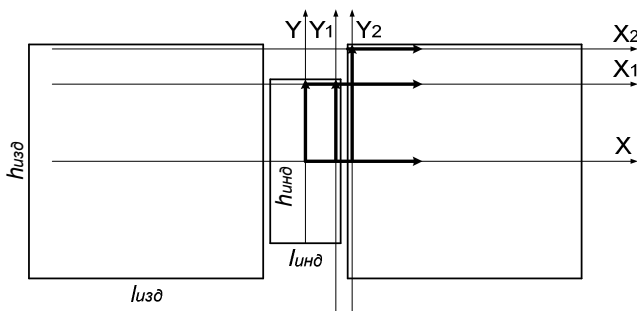


Рис. 1. Конструктивный чертёж индукционного нагрева

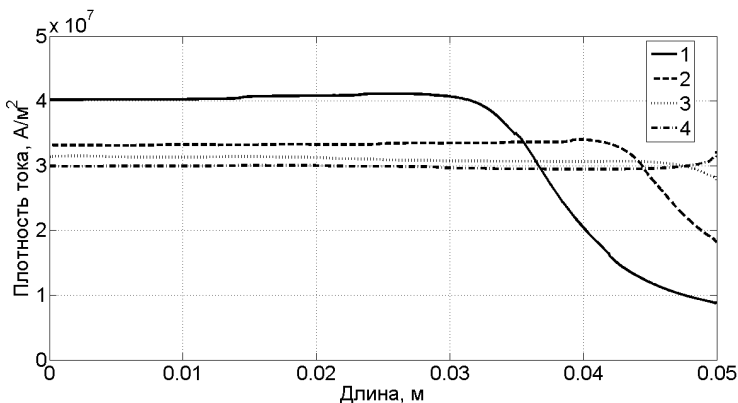


Рис. 2. Распределение плотности тока по поверхности изделия: 1 – $h_{\text{инд}}/h_{\text{изд}} = 0,7$; 2 – $h_{\text{инд}}/h_{\text{изд}} = 0,9$; 3 – $h_{\text{инд}}/h_{\text{изд}} = 1,0$; 4 – $h_{\text{инд}}/h_{\text{изд}} = 1,1$

Анализ полученных результатов говорит о том, что увеличение размеров индуктора приводит к уменьшению концентрации плотности тока

на поверхности изделия и, как следствие, сказывается на интенсивности его нагрева. В то же время с целью обеспечения равномерного тепловыделения необходимо подбирать оптимальное соотношение высот индуктора и изделия, которое для рассматриваемого случая оказалось равным $h_{\text{инд.}}/h_{\text{изд.}} = 1,1$. При этом дальнейшее увеличение высоты индуктора приводит к перегреву краёв изделия и является нецелесообразным.

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.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

Благодаря особенностям ЕЭС России, связанным с большой протяженностью территорий, наличием крупных энергообъединений, расположенных далеко друг от друга, ППТ и ВПТ могут найти в ней широкое применение. Кроме того, в более отдаленной перспективе все больше будет проявляться тенденция, связанная с развитием возобновляемых источников энергии и целесообразно рассмотреть возможность использования электропередачи постоянного тока и ВПТ для интеграции новых источников генерации в существующую энергосистему. Для решения этой задачи отлично подойдет система передачи постоянного тока на преобразователях напряжения. Такая система получает все более широкое применение, благодаря совершенствованию полупроводниковых приборов (запираемых тиристоров и биполярных транзисторов с изолированным затвором) и внедрению их в преобразовательную технику [1]. Основными достоинствами данной системы являются [1]:

- возможность соединения несинхронных электрических систем;
- хорошая управляемость (мгновенное регулирование активной и реактивной мощности);
- повышение статической и динамической устойчивости объединенной энергосистемы;
- предотвращение каскадных сбоев во всей энергосистеме в случае возникновения аварийных ситуаций.

В данной работе рассматривается имитационная модель системы передачи постоянного тока на преобразователях напряжения, разработан-

ная с помощью программного комплекса EMTP-RV. Проводятся исследования по изучению независимого регулирования перетока активной и реактивной мощности на приемном и передающем конце, которое осуществляется с помощью системы управления. Кроме того, изучается работоспособность системы в установившемся режиме работы, а также в режимах симметричных и несимметричных коротких замыканий.

Библиографический список

1. Виджей К. Суд. HVDC and FACTS Controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах: Пер. с англ. – НП«НИИА», 2009.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ СХЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Наличие нелинейных индуктивных и емкостных элементов в электрических сетях, при переключениях (плановые переключения, работа дифференциальной защиты шин и др.) может приводить к образованию феррорезонансных контуров [1]. В электрической цепи ферромагнитными (индуктивными) элементами могут являться силовые трансформаторы, трансформаторы напряжения и тока, шунтирующие реакторы и другие аппараты с массивной обмоткой и стальным сердечником. Емкость в сети представлена разветвленными высоковольтными линиями электропередач, конденсаторами, шунтирующими контактные разрывы высоковольтных выключателей, ошиновкой подстанций [2].

В данной работе рассматривается влияние параметров цепи (емкостей оборудования, относительно земли, емкостей конденсаторов, шунтирующих разрывы выключателей и вольтамперных характеристик трансформаторов напряжения) на возникновение феррорезонансных процессов при коммутации высоковольтных выключателей. Составлена схема замещения для исследования трансформатора напряжения на феррорезонанс. Моделирование осуществляется с помощью программного комплекса EMTP-RV. Производится построение областей опасного феррорезонанса. Разработана трехфазная модель для исследования феррорезонансных явлений. Разработанная модель исследуется в различных режимах работы. Оценка достоверности производится путем сопоставления полученных данных с данными моделирования в апробированной программе FERES, расширении Simulink программной среды MatLab, экспе-

риментальными данными, данными из эксплуатационной практики и анализа аварий, происходивших в сетях. Даются рекомендации по предотвращению феррорезонансных процессов в сети.

Библиографический список

1. **Условия** феррорезонанса с трансформаторами напряжения в сети 220 кВ / Алексеев В.Г., Евдокимов С.А. // Электрические станции. – 1994. – № 10.
2. **В.С. Поляков.** Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными измерительными ТН // Энергоэксперт. – 2014. – № 1.

СЕКЦИЯ 16

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

Председатель – к.т.н., доцент **Макаров А.В.**
Секретарь – старший преподаватель **Зайцев Е.С.**

*Е.В. Абрамченко, соиск.;
рук. С.А. Сбитнев, д.т.н., проф.
(ВлГУ, г. Владимир)*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Известно, что расчеты электрических цепей проводятся с использованием некоего теоретического представления исследуемой цепи, отражающего ее существенные свойства, т.е. на основании модели, которая называется схемой замещения.

История развития электротехники была неоднократно подробно исследована и описана. Существуют работы, посвященные как возникновению и развитию отдельных, наиболее заметных явлений электротехники, так и некоторым знаменитым ученым и подвижникам данной науки. Тем интереснее было обнаружить, что в проанализированной нами значительной массе литературы, исторической, научной и учебной, за единственным исключением [1], осталась незатронутой такая важная тема, как генезис схемы замещения. В учебниках по теоретическим основам электротехники обычно дается понятие идеализированной цепи и ее элементов, источников ЭДС и тока. Исторически создание схемы замещения связано с теорией об эквивалентном источнике, а точнее с эквивалентным источником ЭДС, открытым Г. Гельмгольцем в 1853 году, позже описанным более подробно применительно к задачам электротехники Л. Тевененом в 1883 году [1]. Это позволило представить любую линейную электрическую цепь в виде эквивалентного источника ЭДС и последовательно соединенного с ним сопротивления. Заметим, что эквивалентный источник тока был описан намного позднее, в 1926 году, независимо Г. Майером и Э. Нортоном [2].

Сохранившиеся материалы работы международной электротехнической комиссии (МЭК), относящиеся к началу двадцатого века, подтверждают наше предположение о недооцененной роли схем замещения в становлении электротехники. Первые шаги международного органа по

стандартизации недавно возникшей отрасли, казалось бы, очевидны: утверждение наиболее общих понятий, законов, величин измерения. Тем не менее, МЭК с самого начала предпочла сосредоточить работу на трех направлениях: а) терминологии и составлении словарей на различных языках; б) номинальных характеристиках электрических машин; в) графическом обозначении электрических элементов (фактически схемах замещения). Первый ежегодный доклад МЭК 1909 года сообщает об успехах в данных областях. Технический комитет, организованный МЭК для решения вопросов, касающихся графического представления электрических элементов и ведения документации, работает до сих пор. Рассмотрим некоторые из работ по электротехнике, относящихся к периоду середины девятнадцатого – начала двадцатого века [3], [4]. В них помимо текста и формул используются рисунки, которые, очевидно, недостаточно емко передают суть отражаемого электрического элемента или механизма, и намного реже – схематические графические обозначения [3]. Проанализируем известную всем схему батареи, созданной по подобию простейшего гальванического элемента. Она состоит из двух вертикальных линий. Тонкая и длинная линия представляет положительную пластину из меди (ее площадь стремились увеличить на практике, т.к. при протекании тока на ней скапливался водород, что приводило к росту внутреннего сопротивления), а более толстая и короткая линия – отрицательную пластину из цинка (который окисляется и расходуется в процессе). Не вдаваясь в дальнейшие подробности, отметим, что первые графические обозначения элементов электрической цепи появились из-за необходимости упростить отображение часто упоминаемого оборудования; большая же часть графического материала в работах по электротехнике даже в начале двадцатого века представляло собой рисунки [3].

Появление и развитие графического представления электрической цепи имело обязательный характер для прогресса в электротехнике (можно сравнить с созданием нотной грамоты как необходимого условия появления симфонической музыки). Схема замещения позволяет внести упрощения в исследуемую электрическую цепь и представить ее в виде совокупности отдельных электрических элементов, что, в свою очередь, дает возможность проведения расчетов.

Библиографический список

1. **D.H. Johnson.** Origins of the equivalent circuit concept: The voltage-source equivalent. – Proc. IEEE, 2002.
2. **D.H. Johnson.** Origins of the equivalent circuit concept: The current-source equivalent. – Proc. IEEE, 2002.
3. **S.P. Thompson.** Elementary Lessons In Electricity and Magnetism. – New York, 1917.
4. **G.S. Ohm.** The Galvanic Circuit Investigated Mathematically. – New York, 1891.

Ю.С. Дубинина, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

При эксплуатации электроэнергетических систем возникает вероятность повреждений и ненормальных режимов работы. К ненормальным режимам работы относятся перегрузки. В этом случае происходит скачек тока, который превышает допустимые значения. Это сопровождается повышением температуры токоведущих частей оборудования, что может привести к аварии в системе и нарушению обеспечения электроэнергией потребителей. Для надёжной работы промышленных предприятий и объектов нашей страны огромное значение имеет энергетика, основное требование к которой обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей. Предотвращение возникновения аварий или их развитие может быть обеспечено путем быстрого отключения поврежденного участка. Совершенно очевидно, что дежурный персонал не в состоянии быстро отреагировать на возникновении коротких замыканий и за доли секунды предотвратить развитие аварии. Поэтому электрические установки снабжаются автоматически действующими устройствами релейной защиты.

Релейная защита является основным видом автоматизации, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль над состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение аварийных и аномальных режимов. При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок. При возникновении аномальных режимов защита обнаруживает их и в зависимости от характера нарушения производит операции, необходимые для восстановления нормального режима работы, или подает сигнал дежурному персоналу. Весь период развития релейной защиты можно разделить на 3 этапа: электромеханические реле, статические реле (полупроводниковые), микропроцессорные реле. Праотцом реле является знаменитый русский ученый П.Л. Шиллинг, который в 1831 году изобрел первый электрический телеграф. В основе вызывного устройства заложен принцип работы реле. Затем, чуть позже в 1835 году, великий американский ученый Дж. Генри сконструировал аппарат, который получил свое применение в телеграфии. В 1888 г. выдающийся русский ученый электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский изобрел систему трехфазного тока. Это было важнейшим событием в истории развития электроэнергетики, и системы трехфазного тока, получившей широчайшее применение. Появилась необходимость создания защиты системы от коротких замыканий. Первыми появились токовые защиты, срабатываю-

щие при достижении током установленного значения, называемого током короткого замыкания. К электромеханическим реле относятся: электромагнитные, магнитоэлектрические, индукционные, электротепловые, пьезоэлектрические, электро- и ферродинамические, магнитоотрицательные, вибрационные, электретные реле и ряд других. Принцип действия этих реле основан на возникновении магнитной связи между обмоткой электромагнита и якорем (железной пластинкой). Существенными недостатками электромеханических реле являются большие размеры, значительное потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения, а также трудности в обеспечении надежной работы контактов. В настоящее время производится большое количество полупроводниковых (статических) реле разных модификаций. По сравнению с электромагнитными реле – статические имеют повышенный коэффициент возврата, обладают высокой стойкостью к внешним механическим воздействиям, не подвержены вибрации под действием контролируемого значения тока и имеют более низкое потребление по цепям контроля. Микропроцессорные реле основаны на базе микропроцессорных элементов (микроконтроллера). В настоящее время они являются наиболее распространенными и широко применяемыми видами защиты и имеют ряд достоинств по сравнению с релейной защитой прошлого поколения. Это возможность регистрации аварийных ситуаций, более высокие характеристики реле (быстродействие, чувствительность, надежность), наличие множества сервисных функций, таких как осциллографирование сигналов, самодиагностика. Как и предыдущие поколения реле, у микропроцессорных есть свои недостатки: высокая стоимость, отсутствие возможности взаимозаменяемости приборов и ремонтпригодности в случае выхода из строя блока управления. Наличие недостатков у последнего поколения приборов, говорит лишь об одном, нам есть куда стремиться, а это значит, что микропроцессорные реле – это лишь ступень в проектировании новых поколений релейной защиты.

Библиографический список

1. Федосеев А.М. Основы релейной защиты. – М., Л.: Энергоатомиздат, 2011. – 440 с.

И.А. Зосимов, студ.;
рук. В.А. Мартынов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСТОРИЯ ПЕРЕХОДА ОТ РАДИОЛАМП К ТРАНЗИСТОРАМ

Современная электроника не могла бы существовать без такого элемента, как транзистор, однако, до его изобретения повсеместно использовались радиолампы.

В процессе изобретения радиоламп участвовали такие известные учёные, как Томас Эдисон, Джон Флеминг и Ли Де Форест.

В 1881 году американский изобретатель Томас Эдисон обнаружил явление, которое назвал «эффектом Эдисона». «Эффект Эдисона» заключался в том, что между накаленной нитью и изолированным от нити электродом, введенным в колбу лампы, протекает ток даже в том случае, когда воздух из лампы выкачан. При этом, ток в данной цепи мог течь только в одном направлении: от раскалённой нити к электроду.

Данное свойство заинтересовало английского учёного Джона Флеминга. В 1904 году в опытах по приёму сигналов беспроводного телеграфа он применил лампу Эдисона в качестве детектора с односторонним пропусканием тока. Данная лампа была названа диодом, так как имела два электрода – катод и анод.

В 1906 году американский изобретатель Ли Де Форест поместил в пространство между катодом и анодом проволочную сетку – третий электрод. Так была создана трёхэлектродная лампа – триод. Такая лампа могла работать в режиме усилителя тока.

Радиолампы обладали рядом недостатков, таких как: большие размеры, выделение большого количества тепла за счёт нагрева катода, хрупкость, затраты времени на разогрев катода, недолговечность. В первых компьютерах использовались тысячи ламп, которые размещались в металлических шкафах и занимали много места. Весила такая машина десятки тонн. Для её работы требовалась большое количество электрической энергии, а для охлаждения использовали мощные вентиляторы.

В течение первой половины 20 века, радиолампы непрерывно совершенствовались. Конструкторы старались минимизировать недостатки радиоламп, однако появление транзистора затормозило их дальнейшее развитие.

В 1833 году английский физик Майкл Фарадей, экспериментируя с сульфидом серебра, обнаружил, что его проводимость растёт с повышением температуры.

Следующей стадией развития транзистора стало открытие немецким физиком Фердинандом Брауном важнейшего свойства полупроводников – проводить электрический ток только в одном направлении.

По окончании второй мировой войны изучением электропроводных свойств полупроводниковых материалов занялись специалисты американской исследовательской фирмы «Bell Telephone Laboratories». Под руководством американского физика Уильяма Шокли была создана исследовательская группа. В неё входили Джон Бардин и Уолтер Браттейн.

Эксперименты группы по усилению сигнала с помощью полупроводников терпели одну неудачу за другой, так как теория работы полупроводникового усилителя была выведена неверно, однако, путём проб и ошибок учёным удалось зафиксировать усиление сигнала – транзистор

начал работать. Группа продолжила работу в этом направлении и 23 декабря 1947 года презентовала новое изобретение – точечный транзистор. Спустя 7 дней Уильям Шокли разработал теорию работы транзистора – теорию p-n-переходов.

Транзисторы с каждым годом совершенствовались и постепенно избавлялись от недостатков первой модели: высокого уровня шума, ограниченного диапазона рабочих частот, сильной зависимости электрических параметров от температуры, ограниченной мощности. Кроме этого, транзисторы обладали рядом достоинств, которые выгодно отличали их от радиоламп: малый размер и вес, долговечность, экономичность.

Ещё 20 – 30 лет назад электронные лампы использовались повсеместно – от радиоприёмников до телевизоров. Постепенно частота их применения снизилась и сошла на нет – их место заняли транзисторы. Однако некоторые отрасли так и не смогли отказаться от радиоламп. В настоящее время везде, где необходимы огромные мощности и сверхвысокие частоты, а именно: радиоприёмники и передатчики спутников связи, радиостанции самолётов и кораблей, применяются только радиолампы, так как транзисторы не способны стабильно работать в таких условиях.

Таким образом, транзисторы не уничтожили радиолампы, они вытеснили их в отдельную сферу, а сами фактически заменили их в других областях применения.

В.Р. Рафиков, студ.;
рук. М.С. Сайкин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАДИОЛОКАЦИИ

В 1897 году, русский физик А. С. Попов во время опытов по радиосвязи на Балтийском море, обнаружил прекращение радиосигнала, когда между источником и приёмником радиоволн появлялся корабль. Именно это случайное открытие привело к возникновению нового способа обнаружения объектов в пространстве-радиолокации.

Радиолокация-это способ обнаружения объекта в пространстве с помощью радиоволн. Радиоволны рассеиваются на объектах с другими электрическими свойствами, отличными от среды распространения радиоволн. При этом, отражённая волна позволяет определить местоположение цели.

Системой, позволяющей определять местоположение объекта, а также расстояние до него называют радиолокационной станцией или радаром. В основе устройства первичного (пассивного) радиолокатора лежат три компонента: передатчик-источник электромагнитного сигнала высокой

мощности; антенна-устройство, фокусирующее излучение передатчика, а также, принимающее отраженный сигнал; приемник, который принимает и обрабатывает сигнал. Вторичная радиолокация используется в основном в авиации для опознавания и требует использование активного ответчика с антенной, для передачи сигнала обратно в сторону радара по запросу.

По характеру излучения радиолокационные станции делятся на два типа: импульсные и непрерывного действия.

Радиолокационные станции непрерывного типа излучают высокочастотные электромагнитные волны без перерывов, отраженный сигнал также является непрерывным. Частота сигнала, отраженного от движущегося по направлению к радару объекта, выше частоты сигнала, отраженного от удаляющегося объекта. Данное свойство позволяет определить параметры движения объекта.

При импульсном методе, передатчик излучает импульсы переменного тока, которые поступают на антенну. В промежутках между излучением антенна принимает отраженный сигнал и отправляет его на приёмник, где он усиливается и обрабатывается. Результирующий сигнал подается на лучевую трубку (экран). Современный радар включает в себя компьютер, который отображает сигналы в виде текстовой и цифровой информации.

В настоящее время радиолокационные приборы широко используют в авиации для навигации, определения и корректировки высоты полёта. Радиолокация играет важную роль в освоении космоса. Например, с помощью радаров на бортах космических кораблей были открыты залежи водяного льда в кратере Шеклтон на Луне, составлены карты поверхности Венеры, появилась возможность исследовать структуру Марса. В последние годы становятся актуальными вопросы подповерхностного зондирования и нелинейной локации. Подповерхностная радиолокация дает информацию о свойствах и параметрах среды, ее неоднородности. Нелинейная радиолокация (поиск элементов с вольтамперной характеристикой), используется при поиске от различных радиоэлементов, «жучков» и прочих электронных средств, до радиоуправляемых фугасов и взрывных устройств.

Наиболее важные задачи радиолокации связаны с применением ее в военной технике. Благодаря развитию радиолокационных систем, стало возможным наведение истребителей на вражеские бомбардировщики с наземных или с корабельных радиолокаторов перехвата. Кроме этого можно использовать бортовые самолетные радиолокаторы для обнаружения, слежения и уничтожения техники противника. Бортовые радиолокаторы важны для поиска, осуществляемого над сушей или морем, и оказания помощи в навигации или при слепом бомбометании.

Ракеты с радиолокационным наведением оснащаются специальными автономными устройствами. Для распознавания местности на самонаво-

дящейся ракете имеется радиолокатор, который сканирует земную поверхность и соответствующим образом корректирует траекторию полета. Радиолокатор, расположенный поблизости от противоракетной установки, может непрерывно отслеживать полет межконтинентальной ракеты.

Широкое распространение и развитие радиолокационного оборудования способствует развитию многих отраслей современной техники. Вместе с развитием науки и техники, радиолокационные системы постоянно совершенствуются, появляются новые принципы радиолокации и, конечно, существует масса неисследованных объектов и явлений, где радиолокация должна сыграть значительную роль.

Библиографический список

1. **Сиверс А.П.**, Суслов Н.А., Метельский В.И. Основы радиолокации. – Л.: Судпромгиз, 2007. – 345 с.
2. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоволны>.

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

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Распределённое производство энергии – концепция строительства источников энергии и распределительных сетей. Концепция распределенной генерации подразумевает строительство дополнительных источников электроэнергии в непосредственной близости от потребителей. Мощность таких источников выбирается, исходя из ожидаемой мощности потребителя с учетом имеющихся ограничений и может варьироваться в широких пределах (от двух-трех до сотен киловатт).

Хотя применение распределенной энергетики в России мало развито, но это не означает её полное отсутствие в мире. В целом мировая тенденция показывает рост объемов производимой электроэнергии за счет объектов малой энергетики. Поэтому целью данной работы ставится рассмотрение перспективных источников распределенной генерации для оздоровления российского рынка с новыми технологиями.

Проводя обобщенный анализ современных установок малой мощности была сформулирована классификация данных установок по первичному энергоресурсу, приведены краткие характеристики рассмотренных установок. На этой основе сделан вывод о перспективности применения традиционных установок. К ним отнесены следующие типы установок: ди-

зель-генераторные (ДГУ), газопоршневые (ГПУ), газотурбинные (газовые микротурбины (ГТУ)), паровые микротурбины (ПТУ).

Акцент данной работы ставится на сравнение ГПУ и МТУ между собой, как двух конкурирующих технологий распределенной генерации.

Сравнивая МТУ и ПТУ, был сделан выбор в пользу МТУ по следующим причинам:

- для применения ПТУ необходим источник пара, в то время как МТУ работают на высокопотенциальном газе;
- на МТУ проще выполнить систему АСУ ТП и другой автоматики;
- МТУ имеют меньшее время пуска из холодного состояния нежели ГПУ.

Табл. 1. Основные характеристики ГПУ и МТУ

Параметр	ГПУ (поршневые)	МТУ (турбины)
Стоимость за кВт мощности	\$400 – 600	\$1000 – 1400
Экономичность общая по теплу и электричеству, КПД с когенерацией	Высокая (до 95 %)	Высокая (до 85 %)
Экономичность на кВт, КПД по электричеству	Высокая 35 – 45 %	Низкая 17 – 36 %
Мобильность на нагрузку	Нормальная (30 – 110 %)	Высокая (2 – 110 %)
Выход на полную мощность после запуска	1,5 – 2,5 мин.	17 – 21 мин.
Наработка на отказ	40 – 100 тыс. часов	30 – 60 тыс. часов
Ресурс до кап. ремонта	60 тыс. раб. часов	до 35 тыс. раб. часов
Срок службы	28 – 40 лет	15 – 25 лет
Площадь под установку	Довольно большая, монтаж в контейнерах на специально подготовленной площадке	Маленькая, возможность монтажа на крышах зданий
Соотношение электричество/тепло	1/1,5 (электричество/ тепло)	1/2,5 (электричество/ тепло)

По результатам сравнения выше перечисленных установок сделаны следующие выводы:

- Применение ДГУ эффективной в качестве резервного источника питания;
- Применение ПТУ в качестве источника электрической энергии обосновано при наличии источника пара (реконструкция котельной с паровыми котлами в мини-ТЭЦ);
- Выбор между применением ГТУ и ГПУ обосновывается предпочтениями заказчика, т.к. данные установки имеют свои плюсы и минусы.

Библиографический список

1. <http://forca.ru/>.
2. <http://www.gazecos.ru/>.

Е.А. Бобков, маг.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ FACTS ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЭП СВН

Доклад посвящён вопросам повышения пропускной способности и управляемости ЛЭП СВН московской энергосистемы. Проведённый анализ расчёта установившихся режимов по полной схеме замещения ОЭС Центра в программе RASTR выявил следующие актуальные проблемы:

- неоптимальное распределение потоков мощности между параллельными линиями различного класса напряжения, приводящее к недогрузке ЛЭП СВН и перегрузке распределительных сетей 110 – 220 кВ;

- значительные перетоки реактивной мощности по коротким ЛЭП СВН Московского энергетического кольца, вызванные даже небольшим различием напряжений по концам линии;

- при отключении ЛЭП 500 кВ Белый Раст – Западная или ЛЭП 500 кВ Трубино – Бескудниково возникает перегрузка некоторых линий 220 и 110 кВ, а в ряде режимов и автотрансформаторов 500/220 кВ п/с Трубино;

- недостаточная пропускная способность межсистемных электропередач;
- недостаточный объём устройств регулирования напряжения, слабая управляемость сети в целом.

Применение компенсирующих устройств позволяет повысить пропускную способность ЛЭП, но не решает задачи управления потокораспределением по параллельным линиям различного класса напряжений. При всём этом традиционные компенсирующие устройства имеют ряд недостатков. Например, установка шунтирующих реакторов (ШР) на ЛЭП для ограничения напряжения на холостом ходу и в режиме малых нагрузок приводит к снижению её пропускной способности, синхронные компенсаторы (СК) обладает низким быстродействием в переходных режимах, а устройство продольной компенсации (УПК) вызывает возрастание токов КЗ и перенапряжения при резких изменениях нагрузки.

Рассмотренные проблемы могут быть эффективно решены на основе применения технологии управляемых гибких электропередач переменного тока или, в соответствии с терминологией IEEE, Flexible AC Transmission Systems (FACTS). К основным устройствам FACTS относятся:

- управляемый шунтирующий реактор (УШР);
- управляемое устройство продольной компенсации (УУПК);
- статический тиристорный компенсатор (СТК);

- статический компенсатор на базе преобразователя напряжения (СТАТКОМ);

- объединённый регулятор потоков мощности (ОРПМ).

УШР позволяет стабилизировать напряжение в точке подключения, а также при любой нагрузке ЛЭП обеспечить передачу натуральной мощности.

УУПК решает следующие задачи:

- повышение пропускной способности линии электропередачи;

- исключает возможность возникновения субсинхронного резонанса;

- демпфирование колебаний роторов генераторов после аварийных возмущений [2].

СТК – наиболее эффективен для установки в узлах с резкопеременной нагрузкой. Время реакции СТК в переходных и аварийных режимах не превышает 5 – 10 мс. Однако его работа приводит к необходимости установки фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

СТАТКОМ – позволяет поддерживать требуемый уровень и качество напряжения, повысить пропускную способность линий электропередачи. Он обладает большим быстродействием чем СТК и не требует установки ФКУ.

ОРПМ является универсальным устройством, сочетающим в себе функции статического компенсатора реактивной мощности, установки продольной компенсации и фазоповоротного устройства, что дает возможность регулировать потоки как активной, так и реактивной мощности.

Расчёт установившихся режимов с использованием вышеприведённых устройств показал следующее:

1) Установка УШР/СТАТКОМ (180 МВАр) или замена неуправляемых ШР на ряде п/с (Борино, Западная, Очаково, Каскадная) позволяет существенно снизить потоки реактивной в прилегающей сети 500 кВ (на некоторых линиях со 160 до 10 МВАр) и обеспечить стабилизацию напряжения. При этом снижаются потери электроэнергии в ЛЭП.

2) Установка ОРПМ на ЛЭП Трубино-Владимирская позволяет избежать перегрузки сети 110 – 220 кВ и автотрансформаторов 500/220 п/с Трубино при отключении ЛЭП 500 кВ Трубино – Бескудниково.

Таким образом, применение устройств FACTS является перспективным направлением повышения пропускной способности и управляемости ЛЭП СВН.

Библиографический список

1. **Рыжов Ю.П.** Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учеб. для вузов / Ю.П. Рыжов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

2. **Дьяков А.Ф.** Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. – В 3 т., Т. 2. – М.: НТФ «Энергопрогресс» корпорации «ЕЭЭК», 2012, 668 с.

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

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И В СФЕРЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ

Российская энергетика формировалась в условиях огромной территории страны и обладания богатейшими ресурсами. Став частью мировой экономической системы, российская экономика должна совершить технологический рывок, или она окончательно превратится в топливно-сырьевую периферию развитых стран. Энергосбережение – ключевое слово новой экономической политики страны. В вопросах энергосбережения и повышения энергоэффективности важно организовать четкое взаимодействие с бизнес-сообществом, а также задействовать человеческий фактор, обеспечив информационную и образовательную поддержку мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности использования топливно-энергетических ресурсов на международном, федеральном, региональном и муниципальном уровнях [1].

Энергоэффективность как приоритетное направление развития науки, технологии и техники в Российской Федерации, согласно Указу Президента от 07.07.2011 № 899.

Ускоренного развития неэнергоемких отраслей промышленности и сферы услуг повлекло за собой снижение энергоемкости российской экономики. Тем не менее, энергоемкость российского ВВП в 2,3 раза выше среднемирового значения ввиду: суровых природно-климатических условий; размещения на обширной территории страны населения и промышленных предприятий; преобладанием энергоемких отраслей тяжелой промышленности.



Рис. 1. Положение России в рейтинге стран по уровню энергоемкости ВВП России в 2012 году и перспектива снижения энергоемкости к 2020 году

Рис. 1. Энергоемкость ВВП России

В условиях экономического кризиса энергосбережение становится приоритетной государственной задачей, т.к. позволяет относительно простыми мерами государственного регулирования значительно снизить нагрузку на бюджеты всех уровней, сдержать рост энергетических тарифов, повысить конкурентоспособность экономики и увеличить предложение на рынке труда.

Приоритетными направлениями повышения энергоэффективности являются: административные здания, жилые здания, производство и оборудование.

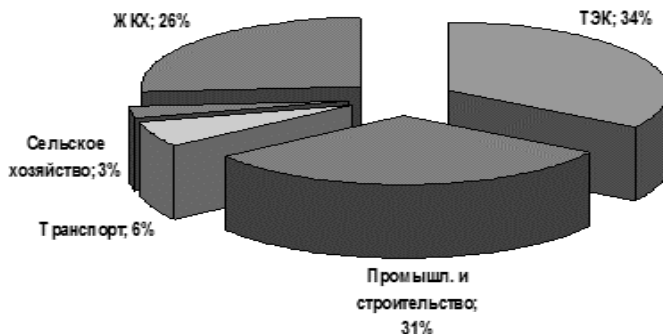


Рис. 2. Потенциал энергосбережения России

Российская Федерация располагает одним из самых больших в мире технических потенциалов повышения энергоэффективности, который составляет более 40 % от уровня потребления энергии. Ресурс повышения энергоэффективности следует рассматривать как один из основных энергетических ресурсов будущего экономического роста.

Библиографический список

1. **Макаров А.** Тенденции развития мировой энергетики и энергетическая стратегия России / А. Макаров, В. Фортвов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.e-m.ru>. – 2004.
2. **Федеральный Закон** Российской Федерации «Об энергосбережении» от 03.04.96 № 28 (с изм., внесенными ФЗ от 08.05.2010 №83-ФЗ) // Российская газета. – № 3181. – 2003.

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

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЭУ И ВЫБОРА ИХ МОЩНОСТИ

В настоящее время ветроэнергетика вступила в полосу интенсивного роста и развития. Начиная с 2007 г. ежегодные темпы прироста ветро-

энергетических мощностей в мире составляют порядка 25 %, ежегодные вложения в ветроэнергетику – около 30 млрд долл. Большинство развитых стран предполагают довести к 2020 г. долю ветроэнергетики в энергетическом балансе своих стран до уровня от 5 до 25 %. По прогнозам, за десятилетие с 2010 по 2020 г. объем электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками во всем мире, возрастет с 120 до 7 000 МВт – почти в 60 раз [1].

При выборе мест для сооружения ВЭУ на территории ВЭС необходимо учитывать следующие критерии:

- площадка под ВЭУ должна быть расположена на выпуклой безлесой местности, свободно обдуваемой ветром;
- средняя годовая скорость ветра должна быть не менее 5 м/с на высоте 10 м от поверхности земли и 6 м/с на уровне ветроколеса;
- расстояние от площадки ВЭУ до экранирующих объектов, превышающих площадку, должно быть не менее 20-ти кратной высоты превышения;
- максимальная удаленность площадок под ВЭУ от существующей сети линий электропередачи должна быть не более 1,5 км, от дорог не ближе 50 м, от жилых строений не ближе 200 м;
- предельная величина допустимой акустической нагрузки от ветроагрегатов не должна превышать для жилых районов 50 дБ днем и 35 дБ ночью [2].

В результате общего анализа ветроэнергетической отрасли были выделены следующие основные недостатки ветроэнергетики:

- непостоянство, т. е. негарантированность получения нужного количества электроэнергии в произвольный момент времени;
- более высокая себестоимость по сравнению с традиционными источниками электроэнергии;
- низкий выход электроэнергии (по мощности) по сравнению, например, с дизельными генераторами;
- высокая стоимость ВЭУ;
- высокий уровень шума, исходящий от работающих ВЭУ [1].

Одним из путей устранения некоторых названных выше недостатков ветроэнергетики является агрегация ВЭУ. В качестве примера были рассмотрены ветросолнечные станции и выделены их достоинства и недостатки.

Достоинства ветросолнечных гибридных электростанций:

- оперативность развертывания в любых погодных условиях;
- возможность стабильности поступления электроэнергии потребителям в минимально необходимом количестве;
- обеспечение постоянства напряжения в автономной электросети;
- отсутствие отклонений и скачков напряжения в сети;
- возможность модернизации электросети под текущие запросы;
- обеспечение нормативов по охране окружающей среды;

- минимальное обслуживание при длительном сроке эксплуатации станции, который примерно составляет 10 – 15 лет;
- существенное увеличение КПД станции за счет одновременного, оптимального сочетания энергии ветра и солнечного излучения.

Основным недостатком таких электростанций является их сравнительно небольшие мощности по обеспечению энергопотребителей [3].

Приведенный анализ факторов поможет выбрать более эффективные варианты конструкций ВЭУ, а также использовать их объединение с другими источниками электрической энергии применительно к конкретному региону.

С учетом таких достоинств ветроэнергетики, как экологичность, возобновляемость независимость от времени суток и возможность агрегации с другими видами источников электроэнергии, она имеет хорошие перспективы для дальнейшего развития и внедрения по всему миру.

Библиографический список

1. **Системная** классификация факторов, определяющих выбор вариантов размещения объектов ветроэнергетики / Дебиев М.В., Попов Г.А. // Управление и моделирование технологических процессов и технических систем ISSN 2072-9502. – Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 2.

2. **Оценка** ветроэнергетических ресурсов разработка рекомендаций по выбору мест размещения ветроэнергетических установок на территории республики Беларусь / Трифонов А.Г., Михальчева Э.А., Камлюк Г.Г. // Сб. докл. семинара экспертов по возобновляемым источникам энергии. – 2011.

3. **Ветросолнечные** гибридные электростанции – практичность в применении альтернативных источников энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/energy/1046-vetrosolnechnyegibridnye.html>.

П.С. Кочкин, студ.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОПОВОРОТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РОССИИ

Поток активной мощности в линии переменного тока пропорционален синусу угла сдвига по фазе между вектором напряжения источника электроэнергии в начале линии и вектором напряжения приемника электроэнергии в конце линии. Таким образом если имеется сеть линий разной мощности, то, принудительно изменяя величину угла сдвига между векторами напряжений источника и приемника электроэнергии в одной или нескольких линиях, можно перераспределять потоки мощности между линиями электрической сети. В результате появляется возможность реа-

лизации более благоприятных сценариев загрузки линий сети относительно естественного распределения потоков мощности, которое часто приводит к перегрузке маломощных линий, ограничению пропускной способности мощных линий, увеличению потерь электроэнергии и другим негативным последствиям. Фазоповоротный трансформатор выполняет функцию принудительного изменения величины угла сдвига между векторами напряжений источника и приемника электроэнергии.

В России были разработаны два проекта по применению фазоповоротных трансформаторов.

Первый проект применения ФПТ в России был разработан отечественными специалистами в 1996 г. Проект предусматривал установку на подстанции 500/220 кВ Костромской ГРЭС шести ФПТ оригинальной конструкции. Проект был рассмотрен на заседании НТС РАО «ЕЭС России» 18 февраля 1996 г., одобрен, но так и не реализован.

Второй проект применения ФПТ в России был разработан российскими специалистами в 2009 г. В нем предлагалось реформировать электрическую сеть России в целях оптимизации маршрутов транспорта и распределения электроэнергии на основе применения фазоповоротных трансформаторов. Сущность проекта состоит в перераспределении потоков энергии между транспортной и распределительной сетями. Данный проект остался также невостребованным.

Достоинства сети, модернизированной на основе второго проекта:

- Две части единой сети (транспортная и распределительная) начинают работать строго по своему назначению.
- Весомость транспортной сети возрастает на величину порядка 30 %.
- Противоаварийная устойчивость к блэкаутам существенно возрастает.
- Суммарная располагаемая мощность генераторов энергосистемы может быть снижена на 3 % за счет снижения потерь в распределительной сети в 2,5 раза.
- Распределительная сеть пополняется за счет перевода части тупиковых линий в контурную конфигурацию, что существенно повышает техническую эффективность ранее разомкнутых линий.
- Основной экономический эффект – снижение потерь в электрических сетях России примерно в 1,4 – 1,5 раза.
- Дополнительный экономический эффект — снижение себестоимости транспорта электроэнергии как по территории страны, так и за ее пределы – в Европу, страны СНГ и Китай.

Оптимальное управление энергопотоками на основе применения ФПТ – наиболее продуктивный способ уменьшения потерь электроэнергии в электрических сетях России до технически обоснованного уровня. Разработав Генеральную схему размещения объектов управления энерго-

потоками в электрических сетях России с приоритетом применения фазоворотных трансформаторов и бизнес-план ее реализации, можно оценить выгоду от установки ФПТ в уменьшении потерь при передаче электроэнергии. Также необходимо учесть возможность применения технологии ФПТ для реализации технологии SMARTGRID, являющейся одной из приоритетных задач развития электроэнергетики России на сегодняшний день.

Библиографический список

1. **Ольшванг М.В.** Постепенная технологическая реформа электроэнергетической сети России для достижения наилучшего использования сетей ФСК и сетей МРСК посредством рационального управления сетевыми потоками. Материалы инновационного предложения. <http://mvo.ipc.ru/>.

2. **Постолатий В.М.** Эффективность применения фазового управления режимами электропередач повышенной натуральной мощности // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – № 3.

3. **Добрусин Л.** Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России. Информационно-аналитический обзор. Ч. II. Тенденции применения фазоворотных трансформаторов // Силовая электроника. – 2012. – No 4.

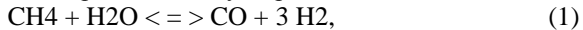
А.С. Кривчикова, студ.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Для любой энергосистемы мира актуальна проблема обеспечения баланса мощности в сети. В случае его нарушения в энергосистеме возникают изменения частоты сети переменного тока и уровни напряжения. Основным графиком нагрузки – суточный (СГН), отражающий суточные ритмы жизни общества имеет характерные участки: дневные пики и ночные провалы. Выравнивание графиков происходит за счет потребителей-регуляторов (ПР) к ним относятся аккумулирующие электростанции. К главным достоинствам ПР можно отнести потребление электроэнергии в часы минимальной нагрузки энергосистемы, а также высокоманевренную генерацию в часы максимальной нагрузки энергосистемы за счет ранее аккумулированного энергоресурса [1].

Сокращение запасов ископаемого топлива принуждает к поиску альтернативных возобновляемых экологически чистых источников энергии. Таким источником может стать водород – практически неиссякаемый возобновляемый источник энергии [2].

Ранее в [3] был рассмотрен процесс выработки водорода на примере Компании «ThyssenKruppIndustrialSolutions». Используемый компанией способ производства водорода самый эффективный и имеет название – паровой риформинг (ПР) легких углеводородов. Метод отличается относительно низким энергопотреблением и лучшим соотношением H_2/CO . В ходе парового риформинга углеводороды реагируют с паром при образовании смеси водорода и оксида углерода. Принцип парового риформинга представлен следующими уравнениями паровой конверсии углеводородов (1) и паровой конверсии оксида углерода (2):



Описанный выше процесс производства водорода возможно осуществлять в периоды минимальной нагрузки энергосистемы. За счет этого в рамках суточного графика нагрузки достигается уменьшение ночного провала, снижается неравномерность графика и отпадает необходимость разгрузки или останова крупных блоков электростанций в ночное время.

Главным достоинством выработки водорода является его аккумулированный энергоресурс, который способен использоваться как дополнительное топливо.

В работе рассмотрен потенциал применения накопителей электроэнергии на примере топливного элемента (ТЭ – электрохимический источник тока, в котором осуществляется прямое превращение энергии топлива и окислителя, непрерывно подводимых к электродам, непосредственно в электрическую энергию, минуя малоэффективные, идущие большими потерями, процессы горения). КПД ТЭ выше чем у традиционных установок и может достигать 90 %.

Химические реакции в ТЭ идут на электродах: водород окисляется на аноде, а кислород (или воздух) восстанавливается на катоде. За счет химической энергии, запасенной в водороде и кислороде, образуется электрическая энергия.

Напряжение, возникающее на отдельном ТЭ, не превышает 1,1 В. Для получения необходимой величины напряжения ТЭ соединяются последовательно в батареи. Батареи ТЭ вместе с элементами газораспределения и терморегулирования монтируются в единый конструктивный блок – электрохимический генератор (ЭХГ). Таким образом использование ТЭ в режимах максимума нагрузки позволит повысить возможную передачу электроэнергии и поддержать стабильность напряжения.

В целом применение водородной технологии может способствовать выравниванию дневного и ночного графиков нагрузки (разряд ТЭ во время максимума нагрузки и зарядка в ночное время). Также данная технология способна оказать влияние на управление потоками мощности, т.е. питать местные нагрузки, когда с этим не справляется общая сеть.

Библиографический список

1. **Электрическая** нагрузки энергосистемы выравнивания графика. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/53/19.php>.
2. **Водородная** энергетика и топливные элементы. Взгляд в будущее. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://energyauek.kpi.ua/download/hydrohen_energy.pdf.
3. **Водород:** Энергетика будущего // Gasworld Россия и СНГ 2014 № 34 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gasworld.ru/uploads/issues/d/2014/27052014_120941.pdf.
4. **Применение** накопителей энергии в электроэнергетике. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elektro-journal.ru/sites/default/files/pdf_files/arts/2005_01_09.PDF.
5. **Перспективы** и проблемы развития водородной энергетики и топливных элементов // Норильский никель, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ngfr.ru/article/pdf/031110_Presentation_cells_1.pdf.

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

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ. МИКРОТУРБИНЫ

В условиях рыночной неясности развития электроэнергетической отрасли одним из самых популярных решений увеличения надежности электроснабжения потребителей считается размещение установок распределенной генерации около центров нагрузок. Рассматривая проблемы развития местной энергетики, естественно, задумываются о вовлечении в малую генерацию современных технологий, обеспечивающих высокий КПД, малые выбросы и небольшую эмиссию углекислого газа, а также позволяющих наиболее эффективно использовать энергоресурсы за счет когенерации. К наиболее современным можно отнести микротурбины. Их новизна и достоинство заключаются в принципиально новом для распределенной энергетики подходе производителя к изготовлению сложного технологического оборудования, стремлении сделать его наиболее простым в эксплуатации и при этом имеющим весь необходимый набор качественных потребительских свойств.

Микротурбина (микротурбогенератор) – компактная турбина. Частично, успех микротурбин обусловлен развитием электроники, делающей возможной работу оборудования без вмешательства людей. Микротурбины используются в самых сложных проектах автономного электроснабжения.

Микротурбины могут работать на большинстве промышленных топлив таких, как природный газ, пропан, дизельное топливо, и керосин, также могут эксплуатироваться возобновляемые виды топлива: Е85, био-дизель и биогаз.

Микрогенератор демонстрирует собой компактную и бесшумную тепло-электростанцию, размещенную в едином модульном блоке контей-

нерного типа, защищенном от внешних воздействий климатических условий, шума и теплоизоляции. Контейнерные блоки допускают устанавливать и эксплуатировать установку в условиях погодной зоны от -55 до $+60$ °С.

Во время работы микрогенератор вырабатывает тепловую и электрическую энергию, давая возможность заказчику получать электричество, тепло и холод в случае надобности методом тригенерации.

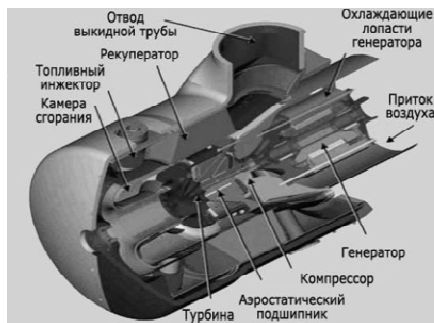


Рис. 1. Конструкция микротурбины

КПД типовых микротурбин крупного производства достигает 35 %. В режиме когенерации электричества и тепловой энергии может достигаться наибольший коэффициент использования топлива – КИТ, выше 85 %.

Микрогенераторы гарантируют наличие резервных мощностей для жизненно необходимых применений (госпитали, лифты, водопровод и канализация) или для тех отраслей, где цена сбоя довольно высока (телекоммуникации, финансы, непрерывное производство).

Распределённая генерация оказывается весьма удобной во множестве случаев. При разработке полезных ископаемых необходимо решать проблему шахтных газов. Применение микротурбин позволит и извлечь экономическую выгоду, и сохранить окружающую среду. Там, где нет централизованных сетей, электроэнергия и тепло могут использоваться на самих месторождениях. А если нефть добывается вблизи с экономически развитым регионом, или есть сети, объединяющие район месторождений с населёнными районами – нефтяные скважины могут в комплексе стать огромной электростанцией.

Применение микрогенераторов может содействовать поддержанию высокого качества энергии в централизованной сети и уменьшать потребность в затратах на реконструкцию и обновление сетей и подстанций. Микротурбины совершают поддержку напряжения и частоты, снижают потери в сетях и затраты на поддержание центральных резервов.

Библиографический список

1. **Гринкевич Р.Н.** Тенденции мировой электроэнергетики.// Вестник ФЭК России. 2003. – № 3. – С. 13 – 21.
2. **Инжиниринговая** компания F.P.K. GmbH: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fpk-gmbh.de/en/index.php>.

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

РАЗВИТИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Распределённое производство энергии (англ. Distributed power generation) – это концепция строительства источников энергии и распределительных сетей, которая подразумевает наличие множества потребителей, производящих тепловую и электрическую энергию для собственных нужд, а также направляющих излишки в общую электрическую или тепловую сеть (см. рис. 1) [1].

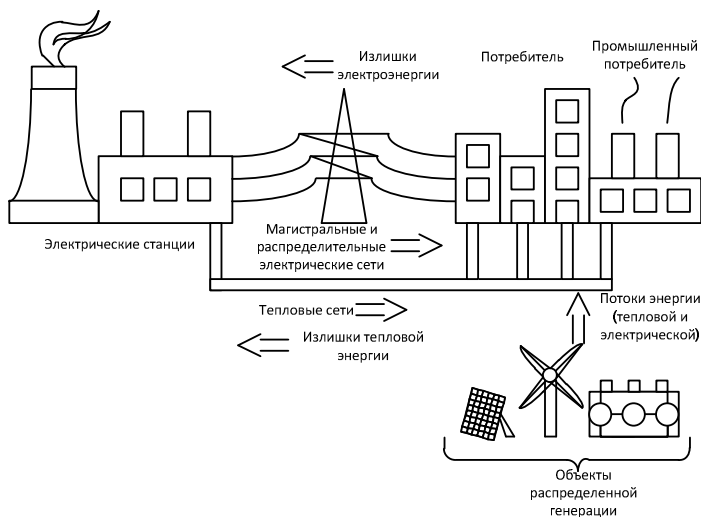


Рис. 1. Схема сети с распределенной генерацией

Распределенная генерация (РГ) является перспективным направлением развития электроэнергетики. Применение РГ позволяет повысить энергоэффективность, снизить стоимость энергии и повысить надежность энергоснабжения для потребителя.

В России можно выделить три категории генерирующих мощностей, которые подпадают под определение распределенной генерации: блок-станции, принадлежащие или арендуемые промышленными предприятиями, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) в населенных пунктах и объекты малой и средней генерации, в числе которых газотурбинные, газопоршневые станции и ВЭИ [2].

На сегодняшний день существует ряд особенностей развития распределенной генерации, которые представлены в табл. 1 [2, 3].

Таблица 1. Особенности развития распределенной генерации

Предпосылки	Условия актуальности
Повышение тарифов на электроэнергию. Зависимость от централизованных сетей. Возможные трудности с подключением к сети.	Потребность электрической и тепловой энергии. Цены на электроэнергию существенно выше цен на топливо. Наличие земельного, денежного и человеческого ресурса.
Достоинства	Недостатки
Снижения затрат на энергию и тепло. Независимость от тарифов и аварий в сетях. Экологичность. Возможность расширения производства на предприятии.	Долгий срок окупаемости. Зависимость от топлива или климата. Необходимость найма доп. персонала. Изменение законов, связанных с РФ. Необходимость дополнительных тех. работ и соблюдение нормативных документов.

В условиях российских промышленных предприятий наиболее целесообразным является строительство ТЭЦ, производящих как электрическую, так и тепловую энергию. Это обусловлено высокой потребностью в тепловой энергии для большинства российских промышленных предприятий. Распределенная генерация выгодна тем, что снижаются перетоки и потери мощности, увеличивается безопасность и снимается необходимость реконструкции и строительства новой сетевой инфраструктуры [3, 4].

Таким образом, становление мощной самостоятельной подотрасли малой энергетики является основой перехода энергетического сектора России на пути модернизации, инновационного развития. Внедрение систем распределенной генерации позволяет извлекать экономическую выгоду и сберегать окружающую среду.

Энергосистема будущего должна будет сочетать крупные электростанции, без которых проблематично электроснабжение крупных потребителей и обеспечение роста электропотребления, и распределенную генерацию.

Библиографический список

1. **Распределённая** энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределенная_энергетика (дата обращения 03.21.2016 г.).

2. Д. Нюшлосс, И.Ю. Ряпин «Электроэнергетика» Энергетического центра бизнес-школы Сколково, 2012.

3. **Распределенная** энергетика 2012 – 2016 годов. Рынок газотурбинных установок для электростанций малой и средней мощности и ГПА //СПб.: INFOLine, 2014. – С. 172.

4. **Dugan R.C.**, McDermont Th.E. Distributed Generation // IEEE Industry Application Magazine. – 2002. – Vol. 33. – № 2. – P. 19 – 25.

А.Ю. Меркулов, студ.;
В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Энергетика – это крупнейшая и ключевая отрасль современной отечественной промышленности. В настоящее время российская энергетика характеризуется недостаточной эффективностью, устойчивостью и надежностью. Для решения существующих проблем в российской энергетике необходим ее переход на новый качественный уровень путем формирования целостной многоуровневой системы управления с увеличением объемов автоматизации и повышением надежности всей системы. Этому способствует интеллектуальная энергетическая система с активно-адаптивной сетью (Smart Grid)[1].

«Smart Grid» – интеллектуальная сеть, которая расширяет при помощи цифровых технологий распределительную и транспортную системы для обеспечения надёжной и качественной передачи электрической энергии от источника к приёмнику в нужное время и в необходимом количестве (см. рис. 1).



Рис. 1. Схема сети с распределенной генерацией

Среди целей создания выделяют следующие: увеличение использования цифровых и контролирующих технологий для обеспечения надежности, безопасности и эффективности электрической сети; динамическая оптимизация операций в сети с обеспечением полной информационной защищенности; развитие и интеграция распределенной генерации, включая возобновляемые источники энергии; управление спросом; использование интеллектуальных технологий для мониторинга состояния сети и управления сетью; интеграция «умных» приборов учета и устройств потребителя; развертывание и интеграция технологий хранения электроэнергии и снятия пиков нагрузки; предоставление потребителям своевременной информации и возможностей управления; разработка стандартов взаимодействия «умных» приборов и оборудования, подключенного к сети, включая инфраструктуру управления сетью (Plug&Play); идентификация и снижение неразумных и излишних барьеров, препятствующих развитию технологий, практик и услуг в области интеллектуальных сетей [2].

Основными проблемами, которые препятствуют распространению технологии Smart Grid в России, являются: значительное количество потребителей, предъявляющих разные требования к качеству электрической энергии; отсутствие надежных накопителей энергии; значительные финансовые вложения в процессе внедрения системы Smart Grid и ее последующего обслуживания; отсутствие стандартов и нормативов; отсутствие мотивации у генерирующих компаний, так при введении технологии, их доходы могут значительно снизиться [3].

В России активным внедрением элементов сетей SmartGrid занимаются такие компании, как МРСК («умные» системы учета) и ФСК ЕЭС (установка БСК, СТАТКОМ, регулируемых шунтирующих реакторов, статических тиристорных компенсаторов, а также создание опытного полигона «Цифровая подстанция»).

Создание интеллектуальных сетей может уменьшить потребность в новой мощности электростанций на 25 – 30 % и сократить капиталовложения в электроэнергетику России на 22 – 23 % за период с 2010 по 2030 г., что даст прямой экономический эффект до 5,5 трлн рублей при необходимых капиталовложениях в 2,4 – 3,2 трлн рублей до 2030 г. Прямой экономический эффект от внедрения Smart Grid в России оценивается в сумму до 50 млрд рублей в год [4].

Несмотря на возникающие препятствия, развитие технологий Smart Grid является важной стратегической задачей, решение которой позволит решить ряд проблем в современной отечественной энергетике.

Библиографический список

1. **Ледин С.С.** Интеллектуальные сети smartgrid – будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – № 11 (16). – С. 4 – 8.

2. **Концепция SMART GRID** – инструмент повышения энергоэффективности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4816 (дата обращения 03.12.2016 г.).

3. **Мировой** и российский рынок технологий SMART GRID [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cleandex.ru/articles/2010/04/13/smart_grid_market (дата обращения 03.12.2016 г.).

4. **"Business Guide (Networked city)".** Приложение. – № 72 (127) 12.12.2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cleandex.ru/files/publications/3400/3460/cleandex_kommersant_11_12_hudesa_tekhniki.pdf (дата обращения 03.12.2016 г.).

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

ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА БАЗЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С ростом установленной мощности электростанций и единичной мощности автотрансформаторов связи увеличиваются токи КЗ в питающей сети ЭЭС. В этих условиях отключающие способности выключателей должны быть приведены в соответствие с изменением уровней токов КЗ.

Отключающую способность некоторых выключателей можно увеличить за счет их модернизации. Другие выключатели необходимо заменять на аппараты с большей отключающей способностью. Это связано с реконструкцией энергетических объектов. Из-за задержки в проведении этих работ в питающих сетях часто эксплуатируются десятки выключателей, отключающая способность которых не соответствует реальным токам КЗ.

В этом случае приходится приводить токи КЗ в соответствие с отключающей способностью выключателей, используя устройства, призванные ограничить токи и сохранить живучесть системы. В схемах питания мегаполисов эти проблемы особо актуальны в связи с высокой плотностью нагрузки [1].

В России применяются следующие виды ограничения токов КЗ:

- установка токоограничивающих электрических реакторов;
- распараллеливание электрических цепей, отключение секционных и шинносоединительных выключателей;
- использование понижающих трансформаторов с расщеплённой обмоткой низкого напряжения;
- отключающее оборудование – быстродействующие коммутационные аппараты с функцией ограничения тока короткого замыкания (плавкие предохранители и автоматические выключатели);
- внедрение устройств релейной защиты.

Мировые достижения в области сверхпроводниковых материалов дают повод рассматривать токоограничители, выполненных на их основе, в качестве альтернативы существующим. Концепция использования сверхпроводников для передачи электрической энергии и для ограничения пиковых токов связано с открытием сверхпроводников. Токоограничивающие свойства зависят от их нелинейной реакции на температуру, ток и магнитное поле. Увеличение любого из этих трех параметров может вызвать переход от сверхпроводящего к нормальному проводящему режиму.

В качестве передовых и перспективных технологий можно выделить:

- Резистивный сверхпроводящий токоограничитель (СПТО). Резистивные СПТО используют сверхпроводник в качестве основного материала при нормальной эксплуатации сети;

- СПТО с экранированным сердечником. Одна из первых конструкций СПТО была разработана для разветвления в сети защит, это разновидность резистивного типа ограничителя, который позволяет ВТСП в криогенной среде оставаться механически изолированным от остальной части схемы. Электрическое соединение между линиями и элементами ВТСП осуществляется на основе взаимного сопряжения переменного тока катушки через магнитное поле;

- СПТО с насыщающимся сердечником. В отличие от резистивного и экранированного типа СПТО, которые полагаются на охлаждение сверхпроводников для увеличения входного сопротивления, данный тип использует динамическое поведение магнитных свойств железа, чтобы изменить индуктивное сопротивление линии переменного тока [2].

Из сказанного следует, что применение сверхпроводниковых технологий дает целый ряд преимуществ: уменьшение стоимости, повышение компактности оборудования при сохранении эффективности. Дальнейшее развитие целесообразно путем совершенствования конструкции и методики выбора.

Библиографический список

1. **Программа** инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС» до 2016 года с перспективой до 2020 года. Утв. советом директоров ОАО «ФСКЕЭС». Протокол от 07.04.2011 № 128. – М., 2011.

2. **Superconducting** fault current limiter application, technical and economical benefits, simulations and test results / W. Paul, M. Chen, M. Lakner, ets. – Cigre Session. – Paris, 2000. – Pp. 13 – 201.

3. **Survey** of Fault Current Limiter (FCL) Technologies. – EPRI, Palo Alto, CA: 2005.

4. **Survey** of Fault Current Limiter (FCL) Technologies – Update, EPRI, Palo Alto, CA: 2008.

5. **Design**, Test, and Demonstration of a Saturable Core Reactor HTS Fault Current Limiter, 2009 DOE Peer Review, August 4 – 6, 2009. Alexandria, VA.

6. **A New Project** on Applying 22.9kV HTS Cables and SFCL to KEPCO Power Grid, 2008 EPRI Superconductivity Conference, Nov 11, 2008. Oak Ridge, TN.

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

ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ БИОМАССЫ КАК ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Одним из видов возобновляемых источников энергии является биомасса. Ее широкое использование позволяет сократить потребление ископаемого топлива. Биомасса включает различные материалы, прямо или косвенно получаемых с помощью реакций фотосинтеза. К материалам относятся: древесное топливо, отходы древесины, сельскохозяйственные и агропромышленные отходы, отходы животноводства, твердые бытовые отходы и осадки сточных вод и т.д.

Сегодня используются две формы первичной энергии, получаемой из биомассы с помощью прямого сжигания – это тепло и электричество. В отличие от ископаемого топлива, биомассу сложно перерабатывать, хранить и особенно транспортировать. Это приводит к необходимости преобразования биомассы в жидкие, газообразные и твердые виды топлива. Это может быть достигнуто биохимическим (ферментация) и термохимическим (пиролиз, газификация) путями [1].

В настоящее время наиболее распространенными термохимическими методами обработки биомассы являются: пиролиз (биомасса преобразуется непосредственно в твердые, жидкие и газообразные продукты путём термического разложения в отсутствие воздуха/кислорода) и газификация (биомасса преобразуется в горючую газовую смесь путем частичного окисления биомассы при более высокой температуре в диапазоне 800 – 900 °С).

По скорости нагрева пиролиз может быть классифицирован как медленный и быстрый. Медленный пиролиз более эффективный метод превращения биомассы в твердое биотопливо. Этот процесс используется в основном для производства угля и делится на два типа: карбонизацию и обычный пиролиз.

Быстрый пиролиз – это высокотемпературный процесс, в котором сырье биомассы быстро нагревается до 450 – 600 °С в отсутствие воздуха. Основным продуктом быстрого пиролиза является бιονефть, а также побочные продукты – полукок и газ, которые используются в процессе для обеспечения подвода тепла, поэтому отсутствуют потери. Этот процесс в настоящее время представляет особый интерес для производства жидких углеводородов, поскольку жидкость храниться и транспортируется проще, может использоваться для получения ряда специальных и

товарных химических веществ. Полученная бионефть способна замещать собой нефть для любых целей [1].

Мгновенный пиролиз представляет собой процесс, в котором время реакции составляет всего несколько секунд или даже менее. Скорость нагрева является очень высокой. Это требует особой конструкции реактора. Имеются 2 типа реакторов: поточный реактор и реактор с псевдоожиженным слоем[1].

Мгновенный пиролиз подразделяется на гидропиролиз, быстрый термический процесс, солнечный мгновенный пиролиз и вакуумный мгновенный пиролиз.

Солнечная термохимическая конверсия углеродсодержащих материалов является одним из наиболее часто предлагаемых вариантов. При этом процессе повышается тепловая эффективность сырья; исключается разбавление продуктов конверсии балластными продуктами сгорания и азотом воздуха; исключается эмиссия парниковых газов в атмосферу при переработке биомассы; отсутствует необходимость в дополнительных капиталовложениях на оборудование для получения кислорода; повышается эксергетический КПД процесса конверсии [1].

Газификация подразделяется на воздушную и паровую. Газ с низкой теплотворной способностью, производимый при воздушной газификации биомассы, может использоваться для сжигания в котлах, а также печах и двигателях внутреннего сгорания. Газ с высокой теплотворной способностью, полученный при паровой газификации, имеет более широкий спектр применения: производство электроэнергии в газотурбинных установках, химических веществ, биогаза (метана), жидких топлив и водорода. Они получают из синтез-газа после его очистки, путем каталитической конверсии или метанаии [1].

Таким образом получение из биомассы первичного топлива: угля, торрефицированной биомассы, биогаза, генераторного газа, синтез-газа, этанола, биодизельного топлива, метанола, растительного масла, пиролизного масла является эффективной и перспективной технологией для производства энергии, а также химических веществ и транспортного топлива. Методы термохимической конверсии необходимо шире внедрять в производственный процесс, чтобы уменьшать зависимость от ископаемого углеводородного топлива. Энергия, полученная из биомассы, является не только возобновляемой, но и экологически чистой с точки зрения выбросов парниковых газов.

Библиографический список

1. **Хутская Н.Г.** Энергосберегающие технологии термохимической конверсии биомассы и лигнокарбонатных отходов: учебно-методическое пособие по дисциплине «Топливо и его использование» / Н.Г. Хутская, Г.И. Пальченок. – Минск: БНТУ, 2014. – 53 с.

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Автоматизированный электропривод является энергетической основой автоматизации производственных процессов. Он представляет наиболее крупного потребителя вырабатываемой в стране электроэнергии. Снижение потребления энергии электроприводами – весомый вклад в реализацию Энергетической программы. В настоящее время рассматриваются вопросы энергосбережения, улучшения качества электроэнергии, снижения материалоемкости и трудовых затрат в процессе разработки и производства элементов электроприводов и комплектных устройств.

Основные направления повышения энергетической эффективности асинхронных электроприводов:

1. Снижение потерь в электроприводе при выполнении им заданных технологических операций по заданным тахограммам и с определенным режимом нагружения.

2. Изменение технологического процесса на основе перехода к более совершенным способам регулирования электропривода и параметров этого технологического процесса. При этом происходит снижение потребления энергии электроприводом.

3. Объекты, где электропривод сравнительно небольшой мощности управляет потоком энергии, мощность которого на несколько порядков превышает мощность электропривода. Здесь одним из путей снижения электропотребления является обоснованный выбор установленной мощности и типа двигателя, соответствующего реальным потребностям управляемого механизма. Эта задача связана с тем, что коэффициент загрузки многих двигателей составляет 50 % и менее, что говорит либо о низкой квалификации разработчиков, либо о несовершенстве использованной методики расчета мощности электропривода. Необходима разработка более совершенных методик, основанных на более точном учете режимов работы электропривода, изменении его энергетических показателей, тепловых процессов в двигателе, состояния изоляции и т.д.

Второе направление связано с изменением технологического процесса на основе перехода от нерегулируемого электропривода к регулируемому в сочетании с автоматизацией управления параметрами этого технологического процесса. При этом происходит снижение потребления энергии электроприводом. То есть в этом случае снижается удельная энергоемкость технологического процесса, и как результат – потребление электроприводом полезной энергии.

Снизить потери позволяет также переход на более экономичные двигатели, в которых за счет увеличения массы активных материалов (железа и меди), применения более совершенных материалов и технологий повышены номинальные значения КПД на 2 – 5 % и коэффициента мощности.

Немаловажной проблемой является уменьшение потребляемой реактивной мощности. Мерой эффективности, определяющей уровень реактивной энергии в цепях переменного тока, служит $\cos\varphi$ потребителя. Реактивная составляющая полной мощности влияет на потери в активных сопротивлениях источника, питающих линий и приемника. Потери в цепях переменного тока возрастают в $1/\cos^2\varphi$ раз. Так, при $\cos\varphi = 0,8$ потери вырастут в 1,56 раза.

Использование полупроводниковых преобразователей частоты, имеющих коэффициент мощности, близкий к единице, позволяет радикально решить проблему потребления реактивной мощности асинхронными электроприводами.

Важно отметить, что при реализации конкретных проектов, выявляется, как правило, несколько возможных путей энергосбережения. Поэтому для получения максимального эффекта необходим комплексный, основанный на анализе различных вариантов, подход к решению задачи энергосбережения в электроприводе.

Библиографический список

1. **Браславский, И.Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В.Н.Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
2. **Ильинский, Н.Ф.** Электропривод: энерго- и ресурсосбережение / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко – М.: Академия, 2008. – 105 с.
3. **Усынин, Ю.С.** Энергосбережение в электроприводе: монография / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков. – Челябинск: ЮУрГУ, 2011. – 109 с.

В.А. Новиков, маг., А.Н. Мошелева, студ.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПОВЫШЕНИЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для эффективного управления электроэнергетической системой требуется полная и точная информация о параметрах режима, которая характеризует ее текущее состояние. В системе дистанционного управления и сбора данных (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) такая информация поступает с помощью средств телемеханики в виде

телесигнализации о состоянии коммутационного оборудования и телеизмерений параметров режима электрической сети. Но наряду со SCADA-измерениями необходимо рассматривать и данные с устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) [1].

Технология синхронизированных векторных измерений (СВИ) обеспечивает небывалую наглядность того, что происходит в сети в целом, а также на отдельно взятых электростанциях и единицах сетевого оборудования. Но для технического и обслуживающего персонала потребуются усилия, чтобы провести наблюдения с момента появления ненормального режима, суметь проанализировать данные от ближайших УСВИ и в процессе расследования сделать выводы, найти решение и устранить проблему.

Системы СВИ позволят улучшить наблюдение за электрической системой и диагностику проблем, поскольку технология СВИ синхронно производит выборку и запись данных о состоянии сети с беспрецедентной скоростью и степенью детализации. В то время как SCADA производит выборку раз в 2 – 15 с, УСВИ замеряет частоту, векторы напряжения и тока 30 – 120 раз в секунду и подсчитывает значения активной и реактивной мощности по этим векторным измерениям [2]. Таким образом, УСВИ могут улавливать динамические и переходные процессы, не наблюдаемые при отслеживании с помощью системы SCADA, как представлено на рис. 1 и 2.

Более высокая разрешающая способность УСВИ позволяет операторам увидеть детали, которые неясно отражены или полностью пропущены при более медленном контроле системой SCADA. Оператор, который следит за процессом, отображенном на рисунках ниже, только по системе SCADA, может не учесть амплитуду и длительность качаний напряжения и мощности и будет владеть ограниченной ситуационной информацией о возможных значительных производственных рисках в режиме реального времени.

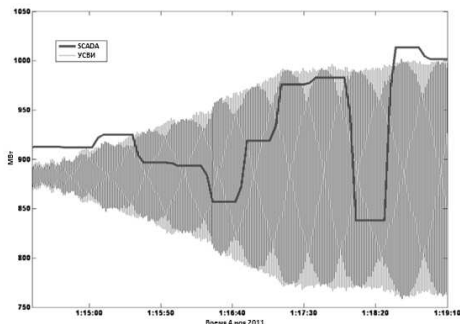


Рис. 1. Сравнение регистрации системой SCADA и УСВИ одного и того же процесса в сети – незатухающих колебаний на электростанции

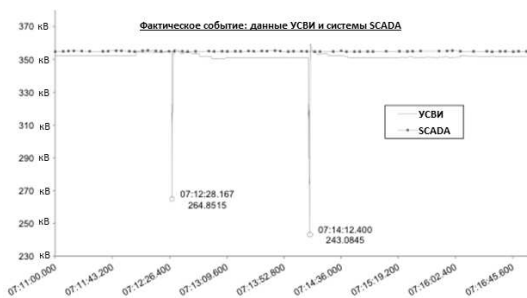


Рис. 2. Сравнение фактического события – УСВИ определяет то, что не может система SCADA

Каждое векторное измерение и подсчитанное значение синхронизируется с всемирным временем (в течение 1 микросекунды, как определено при использовании глобальной системы местоопределения) с получением точных, согласованных по времени измерений, которые можно сравнить и отследить в широких географических пределах. Это облегчает правильное выявление и диагностику событий, характерных для крупных регионов.

Библиографический список

1. Небера, А.А. Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. мат. межд. науч.-техн. конф. – СПб, 2011.
2. NASPI Technical Report. Diagnosing Equipment Health and Mis-operations with PMU Data. – May 1, 2015.

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

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ И ПРОБЛЕМЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В ЧАСТНОМ СЕКТОРЕ

В современном мире ярко выражена проблема экологического состояния планеты. Классические методы генерации электроэнергии наносят непоправимый вред природе. Одним из способов преодоления экологического кризиса является введение распределенной генерации. Данный метод так же благоприятно сказывается на разгрузку ЭЭС и электробезопасность потребителей. В масштабах России введение распределенной генерации в частном секторе позволит обеспечить электроэнергией удаленные населенные пункты. В данный момент в реализации распределенной генерации нашли применение топливные элементы, возобновляемые источники (ветер, солнце, приливы и т.д.), микротурбины). Из-за климатических и географических особенностей РФ на практике приме-

няются автономные источники электроэнергии (АИЭ), приведенные на рис. 1. Наибольший эффект возможно получить от комплексного применения АИЭ.



Рис. 1. Альтернативные источники электроэнергии

При внедрении технологий распределенной генерации у потребителя возникают следующие проблемы:

- отсутствие экономической поддержки со стороны государства;
- несовершенная система тарификации потребителей такого типа (объект может выступать генератором электроэнергии в ЭЭС);
- относительно высокие цены на оборудование;
- невысокая энергоэффективность и несовершенство АИЭ (в настоящее время технологии не способны полностью удовлетворить потребителей с высокими энергетическими запросами);
- официальный запрет генерации электроэнергии в сеть, который связан со сложностями в диспетчерской работе ЭЭС, настройке релейной защиты на энергетических объектах, крупными вложениями со стороны энергетической компаний в оборудование.

На просторах РФ на данный момент самым оптимальным вариантом АИЭ являются различные генераторы на горючем топливе, которые имеют некоторый объем газовых отходов. Выбор такого метода генерации связан с тем, что РФ является топливной державой.

В настоящее время наша страна не входит даже в пятерку лидеров по внедрению альтернативной энергетике, о чем свидетельствуют последние выводы аналитиков из «Renewable Energy Policy Network for the 21st Century».

Таблица 1. Рейтинг среди стран по внедрению и инвестированию альтернативной энергетики

Место Вид энергии	1	2	3	4	5
Геотермальная	Турция	США	Мексика	Кения	Германия / Япония
Гидроэнергетика	Китай	Бразилия	Турция	Индия	Вьетнам
Солнечная	Китай	Япония	США	Великобритания	Индия
Энергия ветра	Китай	США	Германия	Бразилия	Индия
Производство био-дизеля	США	Бразилия	Германия	Аргентина	Франция
Производство топливного этанола	США	Бразилия	Китай	Канада	Таиланд

Для дальнейшего развития данной сферы энергетики необходима государственная поддержка на всех уровнях реализации, усовершенствование технической и математической базы, внесение поправок в законодательство и систему тарификации.

Библиографический список

1. **Энергетика XXI века: Условия развития, технологии, прогнозы** / Л.С. Беляев, А.В. Лагерева, В.В. Посекалин; Отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2004. – 386 с.
2. **Безруких П.П.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии // Энергетическая безопасность и малая энергетика. XXI век: сб. докл. всерос. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 3 – 5 декабря 2002. – С. 30 – 45.
3. **Воропай Н.И.,** Ефимов Д.Н. Требования к противоаварийному управлению ЭЭС с учетом изменения условия их развития и функционирования // Надежность либерализованных систем энергетики. – Новосибирск: Наука, 2004. – С. 74 – 84.
4. <http://raoreform.elektra.ru> <http://raoreform.elektra.ru/>.
5. <http://www.electrosystems.ru/>.
6. <http://www.rushydro.ru/industry/biblioteka/14289.html>.
7. <http://zodiak-energo.ru/articles/article/109/>.
8. <http://ru.wikipedia.org>.
9. <http://elektrikexpert.ru/avtonomnoe-elektrichestvo-dlya-chastnogo-doma.html>.

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

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ВНЕДРЕНИЕ В ЕЭС РОССИИ

В России, в отличие от зарубежных стран, распределенная генерация, в основном, представлена дизельными генераторами, газопоршневыми и газотурбинными агрегатами. Это связано с тем, что главными заказчиками таких установок часто являются крупные промышленные предприятия, которые вынуждены утилизировать побочные отходы производства (например, попутный нефтяной газ). В этих случаях использование собственной распределенной генерации с применением генераторов малой мощности экономически оправдано.

По сравнению с западными странами, традиции централизованного снабжения для большой энергетики в России довольно сильны, равно как и потенциал роста большой энергетики. Поэтому, развитие распределенной генерации в нашей стране фактически ничем не лимитируется. И предпосылкой является появление новых серийных технологий, газотурбинных, газопоршневых установок, микротурбин, других возможностей для покрытия потребностей в электроэнергии.

Сравнительный анализ генерирующих агрегатов по КПД в зависимости от их типов и мощности показал, что самый низкий электрический КПД имеют микротурбины, наибольший – парогазовые установки, и в каждом конкретном случае проектная организация должна решать, какой тип генерирующей установки разумно выбрать.

Второе, на что следует обратить внимание при проектировании объекта распределенной генерации – это варианты подключения объекта к сети. Их два: подключение к шинам подстанций или к фидерам. И тот, и другой имеют свои особенности. При подключении к шинам принципы построения РЗА в прилегающей сети не изменяются, так как не изменяется потокораспределение в прилегающей сети, а электроснабжение потребителей осуществляется по фидерам, отходящим от шин распределительных подстанций с однонаправленным потоком мощности «от шин в линию».

В случае если объект генерации является объектом диспетчеризации Системного оператора, то все изменения его эксплуатационного состояния производятся по согласованию с диспетчерским центром, на стадии долгосрочного и краткосрочного (год, месяц, сутки) планирования и по командам или с разрешения при управлении в режиме реального времени.

Предотвращение технологических нарушений – важная составляющая взаимодействия с Системным оператором. Вне зависимости от статуса объекта генерации (участник оптового или розничного рынка электроэнергии и мощности), все объекты диспетчеризации участвуют в ликвидации технологических нарушений. Диспетчерские команды Системного оператора обязательны для исполнения субъектами электроэнергетики, кроме случаев, когда их исполнение создает угрозу жизни людей, сохранности оборудования или приводит к нарушению условий безопасной эксплуатации атомных электростанций[1].

Ключом к развитию внедрения объектов распределенной генерации является грамотная оценка экономических показателей проектов по их реализации. С появлением новых технологий данные генерирующие установки становятся выгоднее, чем традиционная энергетика.

Пока что основными интересами потребителей остаются возможности резервирования, экономия за счёт снижения расходов, повышенный КПД одновременно генерации тепла и электроэнергии. Энергокомпании уже рассчитывают на существенную поддержку от распределённых генераторов при пиковых нагрузках, на использование этих мощностей для снижения потерь и улучшения параметров работы сети [2].

Положительные эффекты от применения ВИЭ существенны. Первый – экономия топлива. Второй – социальный, то есть заметно улучшается теплоснабжение в малых и средних городах, где преобладают котельные.

Следует отметить, что во всем мире прослеживается тенденция использования объектом распределенной генерации в качестве резерва тра-

диционной. Противостоять этой тенденции бессмысленно. Необходимо найти такое сочетание между ними, чтобы обеспечить оптимальную надежность и экономические затраты [3].

Библиографический список

1. **Родионова М.** Распределенная генерация выходит из тени // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 3.
2. **Агроскин В.** Распределенная генерация, перспективы и проблемы. // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2003. – № 7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://journal.esco.co.ua/2003_7/art13.htm (дата обращения 23.10.2016).
3. **Кривошапка И.** Распределенная генерация в России: конкурент большой энергетике или способ залезть в карман потребителей? // Энергетика и промышленность России. – 2013. – № 5.

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

ТРИГЕНЕРАЦИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящее время в мировой энергетике прослеживается стойкая тенденция к увеличению производства и потребления энергии. Даже с учетом значительных структурных изменений в промышленности и перехода на энергосберегающие технологии, потребности в тепло- и электроэнергии в ближайшие десятилетия будут увеличиваться.

Тепловую энергию невозможно передавать на большие расстояния из-за резкого возрастания потерь с ростом расстояния. Многие энергостанции слишком далеко расположены, чтобы использовать их побочное тепло для обогрева общественных и жилых зданий. Поэтому появилась новая тенденция к развитию локальной энергетики и как следствие широкое применение когенерации как наиболее экономически эффективной и экологичной отрасли топливно-энергетического комплекса. Когенерация – процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии.

Ещё более перспективным является такой вид когенерации как тригенерация. Тригенерация – комбинированное производство электрической тепловой энергии и полезного холода. Тригенерация подходит для всех объектов, имеющих централизованную схему отопления, вентиляции и кондиционирования: аэропорты, банки, фермерские хозяйства, бизнес-центры, учебные заведения, центры обработки данных (ЦОД), предприятия – производители продуктов питания, государственные учреждения, торговые центры, больницы, гостиницы, базы хранения продовольствия.

Холод вырабатывается холодильной машиной, потребляющей не электрическую, а тепловую энергию. Обычно используются абсорбционные бромисто-литиевые холодильные установки.

Абсорбционные холодильные установки являются экономичными и экологически безвредными. Они просты, надежны и не содержат насоса. Лучшие тригенераторы имеют очень высокую общую термическую эффективность: до 86 %, часть из которой, до 40 % – приходится на электрическую энергию. Технологически схема тригенерации представляет собой соединение когенерационной установки с абсорбционной холодильной машиной.

Принцип действия абсорбционной холодильной машины основан на определенных свойствах хладагента и абсорбента, которые обеспечивают отвод тепла, охлаждение и поддержание необходимого температурного режима. Этот процесс проходит в несколько этапов:

1. Охлаждение воды. Вода-хладагент поступает в левую часть камеры – «Испаритель». Внутри, в условиях глубокого вакуума, происходит процесс кипения хладагента, который отводит тепло из охлаждаемой воды, циркулирующей по трубкам теплообменника. Этот процесс непосредственно охлаждает воду, циркулирующую в теплообменнике («вода охлажденная») и выполняет главную задачу, стоящую перед абсорбционным чиллером.

2. Абсорбция. Капли концентрированного раствора бромида лития подаются в правую часть камеры («абсорбер»), где абсорбируют пары воды-хладагента. Для того, чтобы не допустить повышения температуры бромида лития и потери его абсорбирующих свойств, необходима охлаждающая вода, которая стабилизирует его температуру

3. Нагрев абсорбента. Раствор бромида лития, полученный после абсорбции, направляется в генератор при помощи насоса. Там под воздействием тепла из него выкипает часть воды. Это восстанавливает начальную концентрацию бромида лития в растворе, что нужно для поддержания его абсорбирующих свойств.

4. Конденсация хладагента. В конденсаторе происходит процесс конденсации пара хладагента, образовавшегося при кипении раствора в генераторе. Далее, эта вода-хладагент вновь попадает в «испаритель» (левую часть камеры) и цикл повторяется заново.

В системах тригенерации на базе АБХМ практически нет выбросов парниковых газов, отсутствуют вредные химические загрязнения, т.к. в качестве хладагента используется вода. Важно отметить, что использование тригенерации – одна из лучших технологий, доступных для сокращения выбросов парниковых газов и других загрязнений окружающей среды.

Основным преимуществом тригенерационной системы является производство того же количества энергоресурсов за счет значительно мень-

шего количества топлива, чем в случае раздельного производства электроэнергии и тепла.

Обсуждается возможность использования существующих систем отопления для подачи охлажденной воды в жилые дома от абсорбционных холодильных машин (АБХМ), которые предполагается размещать на существующих или вновь строящихся ЦТП. Эта идея практически нереализуема по нескольким причинам:

- Внутридомовые системы отопления не имеют тепловой изоляции. При транспорте охлаждающей воды ($6 - 12\text{ }^{\circ}\text{C}$) по ним конденсация влаги на них в летнее время неизбежна.

- Перепад температур в системах холодоснабжения ($6 - 7\text{ }^{\circ}\text{C}$) в 4 раза меньше, чем в системах отопления. Даже при вдвое меньшей нагрузке скорость холодной воды в трубопроводах по сравнению с отопительной водой увеличится вдвое и превысит допустимые величины ($0,8 - 1,2\text{ м/с}$) с недопустимым шумовым эффектом.

- Тепло- (холодо-) отдача нагревательных (охлаждающих) приборов зависит от средней разности температур, которая в системах отопления составляет $64,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в системах холодоснабжения не превышает $8 - 9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Все вышеуказанное исключает возможность организации централизованного холодоснабжения в существующих жилых зданиях без повсеместной перекладки трубопроводов и замены нагревательных приборов на нагревательно-охлаждающие вентиляторные конвекторы (fancoil) с отводом конденсата.

Тригенерация набирает популярность во многих странах мира. Cogent ввела источник тригенерации на заводе Coca-Cola в северном Сиднее в 2011 году. В Лондоне компания Pricewaterhouse Coopers получила правительственную награду после установки системы unqueTrigen в своем офисе рядом с лондонским Тауэром. В Германии автопроизводитель Daimler в мае ввел в эксплуатацию третью тригенерационную станцию на заводе Mercedes-Benz в Раштатте. Испанский производитель пива DAMM установил генерирующий источник на своем заводе в Барселоне. В Саудовской Аравии компания CES Energy объединилась с AlAman для строительства и эксплуатации тригенерационной установки мощностью 16 МВт в бизнес-парке в Джидде, включающем в себя 52-этажную башню. В США системы тригенерации стали частью решения проблемы последствий штормов и торнадо.

Поверхностные знания сути производства комбинированной энергии на ТЭЦ, политический заказ на усреднение тарифов для всех видов энергии, привели к тому, что до настоящего времени в России не создано экономических условий для создания теплоэнергетических систем объединяющих в едином технологическом цикле систем теплоснабжения и систем хладоснабжения.

В качестве первой ласточки по внедрению тригенерации в России, институтом теплофизики СО РАН и Санкт-Петербургским государственным университетом низкотемпературных и пищевых технологий, разработана схема обеспечения централизованного хладоснабжения и кондиционирования с потребностью в холоде до 114 мВт, температурой холодной воды 7/12 °С которая реализовывается в проекте Московского международного делового центра (ММДЦ) «МОСКВА-СИТИ».

В данной работе рассмотрены проблемы и перспективы применения набирающей популярность в мире технологии – тригенерации. Тригенерация обладает следующими преимуществами: максимальная приближенность и возможность применения для любого потребителя как в качестве основного, так и резервного источника энергии, установка в любом месте, надежность в работе, быстрая окупаемость и долгий срок службы основного оборудования (до 25 лет до полного списания). Однако есть и проблемы применения данной технологии: в хладоснабжении перепад температур весьма невысок, что вызывает увеличение скорости холодной воды по отношению к отопительной, появится недопустимый шумовой эффект. Внутридомовые системы отопления не имеют тепловой изоляции и при транспорте холодной воды по ним конденсация неизбежна. Для решения этих проблем требуется перекладка трубопроводов и замены нагревательных приборов. Это стоит больших денег.

Библиографический список

1. **Стрельников А.С.,** Дружинина А.А. Проблемы и перспективы развития когенерации в России.
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Когенерация>.
3. http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3093.
4. <http://www.powercity.ru/catalog/trigeneratsiya/>.
5. <http://www.eprussia.ru/epr/231/15428.htm>.
6. <http://www.combienergy.ru/>.
7. <http://www.energosoвет.ru/entech.php?idd=98>.
8. <http://www.ngenergo.ru/blog/trigeneratsiya/>.

Т.С. Фролова, студ.;
рук. В.А. Савельев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В СТРАНАХ ЕС

Развитие альтернативной энергетики и поиски новых источников энергии – главная мировая тенденция XXI века. Главным достоинством

ВИЭ перед ископаемыми видами топлива является их экологичность и возобновляемость.

Наиболее распространенными инструментами стимулирования использования ВИЭ в европейских странах являются: компенсации (премии) к тарифам на энергию, получаемую от ВИЭ; освобождение от налога части прибыли, инвестируемой в развитие нетрадиционной энергетики; освобождение потребителей «чистой» энергии от экологических налогов; тендеры и квоты («зеленые сертификаты») на поддержку различных видов ВИЭ из общего специального фонда.

В тех странах, которые оказывают исследованиям, разработке и внедрению альтернативных способов получения энергии государственную – законодательную и экономическую – поддержку, результаты особенно заметны. Так в Германии 25 % (на 2012 г.) и 31 % (на 2014 г.) всей электроэнергии было выработано на альтернативных источниках – энергии солнца, ветра и земли.

На рис. 1 представлен график, показывающий количество выработанной энергии от возобновляемых источников энергии в Германии. Из рисунка видно, что в 2014 году генерация из фотоэлектрических источников составила 35,2 ТВт·ч и обеспечила примерно 6,9 % конечного потребления электроэнергии. Это больше, чем давала ядерная генерация в стране в лучшие годы. Гидроэнергетика в Германии занимает лишь 4 %. Ветроэнергетика и генерация на «всяком мусоре» даёт вклад примерно по 10 %. Причем у фотоэлектрических систем и у генерации на биомассе наблюдается значительный рост в период с 2004 по 2014 года. У ветрогенерации был небольшой спад в 2009 году, после которого рост вырабатываемой мощности возобновился. Гидроэнергетика за 10 лет осталась на уровне 4 %.

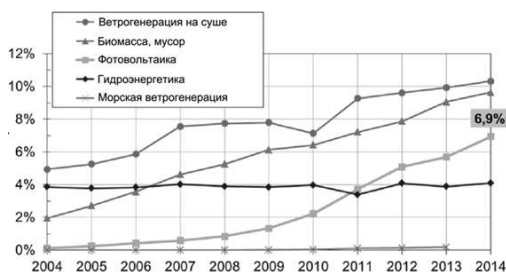


Рис. 1. Энергия, полученная в процентном соотношении из возобновляемых источников энергии в Германии

В России на долю альтернативной энергетики приходится 1 %. Сложившаяся ситуация объясняется тем, что в России практически нет законодательной базы для развития ВИЭ, власть и крупный бизнес не заинте-

рессованы, чтобы потребление традиционных источников энергии уменьшалось, поскольку основные доходы связаны именно с добычей и использованием нефти и газа.

России нужно активнее вкладываться в возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Это касается строительства ветряков и солнечных батарей в населенных пунктах Сибири и Дальнего Востока, в которых доступ к общим энергосетям невозможен. В эти программы входит строительство геотермальных электростанций на Камчатке, электростанций на биотопливе и малых гидроэлектростанций в европейской части России, на Кавказе и в Дальневосточном округе. Эта работа делается там, где есть необходимость в энергообеспечении, но нет возможности подключения к традиционным источникам электрогенерации.

Состояние ВИЭ в Европе находится на высоком уровне, особенно в Германии, которая является ярким примером внедрения ВИЭ. По программе развития энергетики России к 2035 году предполагается увеличить долю ВИЭ с 1 до 8,4 %, а также выделять на ГЭС и ВИЭ до 11 % от всех капиталовложений, вкладываемых в электроэнергетику. Ветряным, как и солнечным, установкам есть место в энергетике России, но не взамен основе.

Библиографический список

1. **Состояние** и перспективы развития альтернативной энергетики в северных регионах России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fsdejournal.ru/node/604#>.
2. **Прогнозы** мировой энергетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea.org/russian/publications/>.
3. **Нетрадиционная** энергетика в странах ЕС: экономическое стимулирование развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.km.ru/referats/41E0640EF50842098A0C6D5EF61A86B7>.
4. **Ветроэнергетика** в Германии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hydrop24.ru/GidroenergetikaSvoimiRukami/vetroenergetika-v-germanii>.
5. **Сектор** биогаза и биомассы в Германии. Сегодня и завтра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://belarus.ahk.de/fileadmin/ahk_belarus/Dokumente/Praesentationen/02_IR_2015_FvB_Biogas_und_Biomasse_in_DE.pdf.
6. **Альтернативные** источники энергии в России: современные реалии и потенциал развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energya.by/alternativnyie-istochniki-energii-v-rossii-sushhestvuyushhie-realii-i-potentsial-razvitiya/>.

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

МНОГОУКЛАДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЕЁ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Применение многоукладных источников энергии набирает все большую популярность в связи с тем, что запасы исчерпаемых источников –

нефти, газа, торфа, угля – стремительно уменьшаются. После того, как ископаемые виды топлива иссякнут, многоукладные источники должны будут готовы их заменить в полном объеме, и это можно будет сделать только в том случае, если технологии использования возобновляемых источников энергии (ВЭИ) будут прогрессировать дальше. Также возобновляемые источники энергии рассматривают как лучший способ борьбы с глобальным потеплением и изменением климата. Чем больше многоукладных источников мы используем, тем меньше ископаемого топлива мы сжигаем, что в конечном итоге приводит к сокращению выбросов углекислого газа.

Задачей аналитической работы стало рассмотрение основных видов многоукладных источников энергии и оценка дальнейших перспектив их использования, а также анализ тенденций развития отрасли многоукладной энергетики в целом.

Согласно Глобальному отчету по состоянию возобновляемой энергетики и энергоэффективности [1] к концу 2015 года установленных ВИЭ мощностей было достаточно для обеспечения электрической энергией примерно 23,7 % мировой потребности. По прогнозу Международного энергетического агентства (МЭА) к 2030 году доля возобновляемых источников в мировой энергетике составит 32 %. Таким образом, они станут лидерами в мировом энергобалансе.

Глобальные инвестиции в возобновляемую энергетику и топливо достигли в 2015 году \$285,9 млрд., что вдвое больше объема инвестиций в энергетику на угле и газе (\$130 млрд.). Сегодня эта самая высокая наблюдаемая разница в пользу развития ВИЭ. При этом тенденции развития внутри области многоукладной энергетики различны. Рост инвестиций приходится на солнечную и ветроэнергетику.

Библиографический список

1. **Состояние** возобновляемой энергетики 2016 // ren21.net: ежегод. изд. 2016. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_KeyFindings_RUSSIAN.pdf (дата обращения: 8.12.16).

СЕКЦИЯ 17

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Председатель – к.т.н., доцент **Лапшин В.М.**
Секретарь – к.т.н., доцент **Сульнинков И.Н.**

А.Г. Баран, студ.;
рук. Е.Г. Пономаренко, к.т.н., доц.
(БНТУ, г. Минск)

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА 110 КВ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ 110/10 КВ

В электроустановках высокого напряжения энергосистем широко применяются токоведущие конструкции с гибкими проводниками. Особенностью их динамики является недопустимое сближение и даже схлестывание соседних фаз в результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ), сопровождающегося ударными нагрузками на конструктивные элементы распределительных устройств (РУ) и воздушных ЛЭП. Электродинамическое воздействие больших токов КЗ – ключевые факторы, влияющие на выбор геометрических размеров и механической прочности токоведущих конструкций с гибкими проводниками.

Необходимость учета возможности возникновения чрезмерных механических нагрузок на проводники и элементы конструкций воздушных ЛЭП и РУ с гибкими проводниками при их колебаниях во время коротких замыканий и сразу после отключения тока КЗ была осознана энергетиками еще в середине прошлого века.

При оценке электродинамической стойкости конструкции в проектной практике нельзя полагаться на результаты одного расчета. Следует провести серию расчетов с подбором наиболее тяжелых условий КЗ для данной конструкции, изменяя величину тока, продолжительность, вид и место КЗ, климатические условия и другие параметры. Причем, наибольшие возможные ток и продолжительность КЗ далеко не всегда будут являться самыми тяжелыми условиями с точки зрения электродинамической стойкости гибких шин со спусками.

Объектом исследования выполненной работы являлась гибкая ошиновка распределительного устройства 110 кВ действующей подстанции

110/10 кВ. Исследования выполнены в связи с ростом уровня тока КЗ в районе расположения объекта.

Распределительное устройство подстанции состоит из шести шинных пролетов длиной 18, 19 и 27 м, а также восьми анкерных пролетов длиной – 25, 21, 16,7 и 16 м. Высоты шинных порталов – 7,85 м, анкерных – 11,35 м, высоты конкретных аппаратов для выполнения расчетов принималась из соответствующих конструктивных чертежей пролетов. Ошиновка РУ выполнена проводом АС-185/29, для подвеса которого использованы гирлянды изоляторов 10×ПС70Е.

Механический расчет и расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительного устройства выполнены по разработанным на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерным программам MR215 и FleBus.

Механический расчет выполнялся в регламентированных ПУЭ для территории республики Беларусь четырех климатических режимах.

Вычислительный эксперимент по оценке электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительного устройства 110 кВ для каждого из пролетов распределительного устройства проводился как в режиме «нормальной» эксплуатации при температуре воздуха в 25 °С при отсутствии ветра и гололедного отложения, так и в четырех регламентированных ПУЭ климатических режимах.

Вычислительный эксперимент выполнен путем проведения серийных расчетов для токов короткого замыкания от 0 до 50 кА с шагом 0,5 кА. Расчеты проводились для двухфазных коротких замыканий между фазами А и В, В и С и А и С.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает что в режиме «нормальной» эксплуатации: по критерию схлестывания проводов фаз ток электродинамической стойкости в 21 кА имеют анкерные пролеты длиной 21 м; по критерию схлестывания спусков отпайки с проводниками шин – наименьший ток электродинамической стойкости в 16 кА имеет шинный пролет длиной 27 м; по критерию схлестывания спусков отпайки – наименьший ток электродинамической стойкости в 23 кА имеет анкерный пролет длиной 16,7 м.

Исходя из этого можно сделать заключение, что в режиме «нормальной» эксплуатации ток электродинамической стойкости рассматриваемого распределительного устройства по критерию схлестывания составляет 16 кА.

В ходе выполнения данной работы также был проведен вычислительный эксперимент по оценке электродинамической стойкости стандартных шинных пролетов длиной 18 и 27 м с различным количеством и сочетанием отпаек открытого распределительного устройства 110 кВ в регламентированных ПУЭ для территории республики Беларусь четырех климатических режимах.

В ходе вычислительного эксперимента установлено, что наличие отпаек в пролетах ограничивает свободные движения гибких шин и тем самым увеличивает ток электродинамической стойкости пролета по критерию схлестывания проводов фаз. Однако наличие отпаек также может уменьшить ток электродинамической стойкости пролета, так как может произойти схлестывание проводников спусков отпаек между собой или с проводами фаз.

*А.Г. Баран, И.П. Климкович, студенты;
рук. И.И. Сергей, д.т.н., проф.
(БНТУ, г. Минск)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛА НАЧАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ШИННОЙ КОНСТРУКЦИИ С ЖЕСТКОЙ ОШИНОВКОЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

Увеличение мощности энергосистемы закономерно приводит к возрастанию токов короткого замыкания (КЗ) на всех уровнях напряжения. Поэтому возникает потребность в разработке новых конструкций электроустановок, обладающих повышенной электродинамической стойкостью. Причем на стадии проектирования таких установок разработчик должен иметь возможность проверить принятые решения расчетным путем, и лишь затем экспериментальный образец должен быть подвергнут довергостоящим испытаниям.

ГОСТ 30323-95 содержит методику расчета электродинамического действия токов КЗ [1]. Но приведенная в нем методика не учитывает конечной длины шин и наличия отпаек, и кроме того, она пригодна только для частного случая расположения шин по одной линии или в вершинах прямоугольного или равностороннего треугольника. Сборные шины современных распределительных устройств зачастую располагаются в вершинах произвольного треугольника.

По разработанным на кафедре «Электрические станции» Белорусского национального технического университета математической модели [2] и компьютерной программе [3] явного метода расчета электродинамической стойкости жесткой ошиновки распределительных устройств 10 кВ проведено исследование влияния начального положения шинных конструкций, расположенных в горизонтальной плоскости и по вершинам треугольников, углы которых равны 90 и 60°. По результатам вычислительного эксперимента получены зависимости изгибающих ($P_{\max \text{ изг}}$) и растягивающих ($P_{\max \text{ раст}}$) усилий на вершины изоляторов и максимального

напряжения в материале шины (σ_{\max}) от начального угла положения токоведущей части [4].

Анализ полученных результатов показывает, что при расположении шин в вершинах прямоугольного треугольника наиболее перспективным углом ориентации шины фазы *A* (вершина прямого угла треугольника), углом при котором имеют место минимальные значения исследуемых величин, является угол 45° . Для фазы *B* минимальные значения $P_{\max \text{ изг}}$ имеют место при угле 162 и 342° , для $P_{\max \text{ раст}}$ – при 164 и 344° , а для σ_{\max} – единственное положение 135° . Для фазы *B* оптимальным углом ориентации шины можно принять угол 164° . Для фазы *C* оптимальным углом ориентации шины можно принять угол 196° .

При расположении шин в вершинах равностороннего треугольника наиболее перспективным углом ориентации шины фазы *A* является угол 0° . При угле 180° значения $P_{\max \text{ изг}}$, и σ_{\max} также имеют минимальные значения, но $P_{\max \text{ раст}}$ – достигает максимума. Для фазы *B* оптимальным углом будет являться угол в 210° , а для фазы *C* – 150° .

При расположении шин горизонтально наиболее перспективным углом ориентации шины фазы *A* является угол 90° . Для фазы *C* – угол 270° . Для фазы *B* минимальные значения $P_{\max \text{ раст}}$ имеют место при угле 0 и 180° , для $P_{\max \text{ изг}}$ и σ_{\max} – при 90 и 270° . Для фазы *B* оптимальным углом ориентации шины можно считать углы 45 , 135 , 225 и 315° . Однако, если учесть тот факт, что изолятор хорошо работает на сжатие и растяжение, то наиболее предпочтительным могут явиться углы с минимальными значениями $P_{\max \text{ изг}}$ – 90 и 270°

В ходе вычислительного эксперимента составлены семейства зависимостей позволяющие конструктору без проведения вычислений оперативно принимать решения о целесообразности планируемого пространственного расположения токоведущих шин и изоляционной конструкции или определить наиболее оптимальное расположение токоведущей конструкции в разрабатываемом изделии. Также полученные результаты позволяют оценить возможность дальнейшей эксплуатации существующих токоведущих конструкций при возросшем на объекте токе короткого замыкания.

Библиографический список

1. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. Введен в действие с 01.03.1999. 57 с.
2. **Mathematical** Modeling of Electrodynamic Forces in a Rigid Busbar Switchgear 6 – 10 kV During Short Circuit / Klimkovich P., Shpakouski A., Baran A., Klimkovich I. // 9th International Conference NEET-2015. – Zakopane, Poland, June 23 – 26, 2015. – P. 64.
3. **RigidBusbars** – компьютерная программа расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с жесткими произвольно расположенными проводниками /

Климкович П.И., Шпаковский А.А., Баран А.Г. // Актуальные вопросы энергетики восточноевропейского региона: мат. междунар. конф., Минск, 21 – 23 октября 2014. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 129 – 131.

4. **Влияние** начального положения элементов жесткой ошиновки 10 кВ на параметры электродинамической стойкости / Баран А.Г., Шпаковский А.А., Климкович И.П.// Наука – образованию, производству, экономике: мат. тринадцатой междунар. науч.-техн. конф. – В 4 т. Т. 1. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 10.

А.Д. Чеботарёв, студ.;
рук. М.Ш. Гарифуллин, д.т.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Сегодня в электрохозяйстве России эксплуатируется множество силовых трансформаторов, которые отработали срок службы, предусмотренный заводом изготовителем. Однако, несмотря на это, можно заметить, что и после нормативного срока службы большинство трансформаторов могут продолжать нормально функционировать, при соблюдении режимов нагрузки и своевременном диагностировании возникающих повреждений. Именно по причине несвоевременного обнаружения и устранения дефектов из строя выходят большинство трансформаторов, отработавших заявленный срок службы [1]. Диагностическое обследование трансформаторного оборудования можно производить как в режиме реального времени, без отключения трансформатора, так и после его вывода из работы. Повысить надежность работы силовых трансформаторов можно внедрив системы комплексной диагностики и мониторинга оборудования. В условиях современного уровня развития элементной базы и информационно-измерительных систем создание системы диагностики является технически реализуемой задачей. Внедрение этих систем позволит эксплуатирующему персоналу своевременно получать сведения о состоянии эксплуатируемого оборудования.

Большинство систем мониторинга нацелены на оценку состояния изоляции и вводов, поскольку именно изоляция и вводы является наиболее важными и наиболее подверженными разрушению элементами силового трансформатора [2]. Для этого осуществляется контроль следующих параметров:

- токи нагрузки;
- влагосодержание в бумажной изоляции;
- тангенс угла диэлектрических потерь;
- частичные разряды;
- влагосодержание в масле;

- газы, растворённые в масле.

Следующим в порядке важности идёт контроль состояния системы охлаждения, для которого отслеживаются следующие параметры:

- температура масла в различных местах бака.
- температура наиболее нагретой точки (ННТ);
- состояние маслонасосов и вентиляторов.

Одним из наиболее важных является анализ содержания растворённых газов в масле (хроматографический анализ). Фирмы Syprotec (Канада) и Kelman (Великобритания) являются мировыми лидерами в производстве данных датчиков.

Также важным является контроль состояния устройств РПН силовых трансформаторов.

На сегодняшний день уже разработано множество систем для мониторинга маслonaполненного оборудования как отечественного (TDM, ETMS, IDD Trans, Диагностика+, Techimp и др.), так и иностранного (TEC-ABB, ZTZ-ТНМ, GE Digital Energy, Calisto, ITG LLC, Siemens TMDS™ и др.) производства. Системы мониторинга разных производителей различаются функциональными возможностями. Помимо контроля за необходимыми величинами, разработаны программные комплексы, осуществляющие учёт данных параметров и автоматизацию диагностики с сигнализацией о нарушении нормального режима, а также возможностью удаленного управления оборудованием.

Применение систем мониторинга способствует предотвращению аварийных повреждений оборудования, что увеличивает срок его службы и повышает надежность электроэнергетической системы. Согласно экспертной оценке установка систем мониторинга целесообразна для силовых трансформаторов напряжением 330 кВ и выше, выработавших свой ресурс, однако, в некоторых случаях необходима установка и для вновь устанавливаемых трансформаторов для особо ответственных потребителей [3]. Одним из недостатков данных систем является их дороговизна. Для решения данной проблемы требуется выбор наиболее оптимального набора контролируемых параметров и соответствующих датчиков, что позволит снизить затраты при достаточной информативности.

Библиографический список

1. **Москаленко Р.В.** Перспективные пути совершенствования диагностики силовых трансформаторов // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 94 – 97.
2. **Организация** мониторинга силовых трансформаторов на базе комплекса «ДИАГНОСТИКА+» / Попов Г.В., Игнатьев Е.Б., Капустин С.А. [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2007. – № 3. – С. 38 – 41.
3. **Лопатин Е.И.** Принципы построения мониторинга трансформаторного оборудования напряжением выше 110 кВ // Наука и образование XXI века: IX междунар. науч.-практ. конф. – Рязань: Современный Технический Университет, 2015. – С. 52 – 57.

*Г.М. Хафизова, А.А. Хафизов;
рук. Ю.И. Шакиров, к.т.н., доц.
(НЧИ К(П)ФУ, г. Набережные Челны)*

СПОСОБЫ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Проблеме оптимизации потребления реактивной мощности в электрических сетях посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ [1 – 3]. Электрические сети характеризуются своими особенностями построения, режимами работы и пр., которые должны учитываться при выборе методов оптимизации.

Компенсация реактивной мощности является одной из главных мероприятий вопросов проектирования и эксплуатации электрических сетей. Правильный выбор компенсирующих устройств положительно влияет на режимы напряжения и реактивных мощностей в узлах сети, потери электроэнергии и на пропускную способность сетевого оборудования и др.

Главной задачей правильного размещения компенсирующих устройств является системный охват электрических сетей всех уровней напряжения, а также взаимосвязь процесса компенсации реактивной мощности с другими задачами, к которым относятся регулирование напряжения, повышение качества электроэнергии, обеспечение надежности работы электросетевого комплекса.

При решении данной задачи нужно совместно рассматривать электрические сети с различными номинальными напряжениями от электростанций до отдельных электроприемников. Так как, осуществить это практически невозможно, нужно разделить все электрические сети на подсистемы и раздельно решить для них задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств [4].

Электросетевой комплекс можно разделить на следующие подсистемы: системообразующий уровень (330 – 1150 кВ); замкнутые и разомкнутые распределительные сети (110 – 220 кВ); распределительные сети 6 – 35 кВ; электрические сети напряжением до 1 кВ.

Компенсация реактивной мощности, в зависимости от размещения компенсирующих устройств, может осуществляться в нескольких видах: индивидуальная, групповая, централизованная и комбинированная (рис. 1).

При индивидуальной компенсации (рис. 1, а) компенсирующие устройства присоединяются наглухо к зажимам электроприемников потребителей сетевых организаций и компенсируют их реактивную мощность. Данный способ позволяет максимально снизить потери в электрической сети, т.к. вся сеть разгружается от реактивной мощности. Так как компенсирующие устройства отключаются одновременно с электроприемни-

ками, здесь имеет место неполное использование компенсирующих устройств, соответственно это является недостатком данного метода.

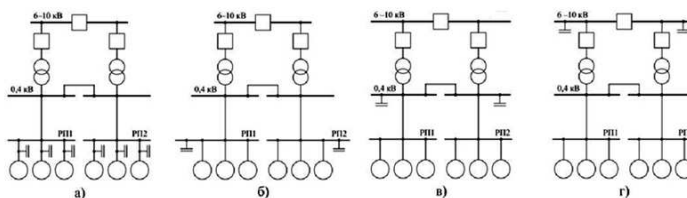


Рис. 1. Способы размещения компенсирующих устройств в электрических сетях: а – индивидуальный; б – групповой; в – централизованный на стороне 0,4 кВ; г – централизованный на стороне 6 – 10 кВ

При групповой компенсации (рис. 1, б) использование установленной мощности компенсирующих устройств увеличивается, а трансформаторы сетевых организации и питающая сеть потребителей разгружаются от реактивной мощности. Однако распределительная сеть до электроприемников остается загруженной реактивной мощностью.

При централизованной компенсации на стороне низшего напряжения (рис. 1, в), имеет место хорошее использование установленной мощности компенсирующих устройств. В этом случае от реактивной мощности разгружаются не только сети 6 – 10 кВ, но и трансформаторы сетевых организации. Недостатком данного метода является то, что распределительная сеть потребителей остается неразгруженной от реактивной мощности.

При централизованной компенсации на стороне высшего напряжения (рис. 1, г), использование установленной мощности компенсирующих устройств оказывается наиболее полным. При такой схеме разгружаются только расположенные выше элементы питающей сети, а электрические сети и трансформаторы сетевых организации остаются загруженными реактивной мощностью.

При комбинированном методе компенсации централизованная или групповая компенсация применяются совместно с индивидуальной.

Так как все перечисленные виды компенсации реактивной мощности имеют свои преимущества и недостатки, выбор способа размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях сетевых организации должен быть обоснован и осуществляться на основании оптимизационных расчетов.

Библиографический список

1. **Веников, В.А.** Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

2. **Лоскутов, А.Б.** Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях / А.Б. Лоскутов, О.И. Еремин // Промышленная энергетика. – 2006. – № 6. – С. 39 – 41.

3. **Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption:** Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. – Washington, D. C., USA, 2005. – 177 p.

4. **Поспелов, Г.Е.** Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, В.Т. Федин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.

Т.Ф. Махмудов, ст. преп.
(ТашГТУ, г. Ташкент)

ВНЕДРЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В зависимости от конструкций массивного ротора асинхронного турбогенератора (АТГ) кратности ударных значений параметров режимов, возникающих при различных видах короткого замыкания на 15 – 80 % меньше, чем в синхронном турбогенераторе аналогичной мощности [1].

Как известно [2], при отклонениях скорости ротора от номинальной мощность (момент) турбины зависит только от скорости вращения ротора и открытия регулирующих клапанов $P_T = \varphi(\omega\mu)$, а мощность генератора – от скорости $P_G = f(\omega)$, здесь ω – угловая скорость ротора агрегата; μ – текущее значение открытия регулирующих клапанов турбины.

В данном случае для простоты можно полагать, что

$$\left(\frac{dP_T}{d\omega}\right) \approx 0, \quad \left(\frac{dP_G}{d\mu}\right) = 1.$$

Характер изменения $dP_G/d\omega$ можно определить следующим образом. Выражая текущее рабочее скольжение машины через скорость вращения ротора:

$$s_A = (\omega_r - \omega_0) / \omega_0 = (\omega_r / \omega_0) - 1 = \omega^* - 1,$$

где ω_0 , ω_r – синхронная угловая скорость магнитного поля статора и скорость вращения ротора асинхронного генератора соответственно; $\omega^* = \omega_r/\omega_0$ – относительная скорость ротора машины, и подставляя его в известную формулу Клосса [1], получаем:

$$P_A = 2P_m \left/ \left[\frac{s_A}{s_k} + \frac{s_k}{s_A} \right] \right. = 2P_m \left/ \left[\frac{\omega^* - 1}{s_k} + \frac{s_k}{\omega^* - 1} \right] \right.$$

где P_m – максимальный электромагнитный момент АТГ, s_k – критическое скольжение.

Тогда коэффициент саморегулирования определяется как

$$\beta_{1A} = \frac{dP_A}{d\omega} = 2P_m \left[\frac{s_k}{(\omega^* - 1)^2} - \frac{1}{s_k} \right] / \left[\frac{(\omega^* - 1)}{s_k} + \frac{s_k}{(\omega^* - 1)} \right]^2. \quad (1)$$

Оценим численное значение β_{1A} для двух вариантов конструкции ротора асинхронного турбогенератора мощностью 500 МВт (АТГ-500):

а) ротор массивный с короткозамкнутыми медными клетками: $s_k = 0.32$ о.е., $s_{A0} = 0.08$ о.е., $P_m = 2.5$ о.е.

б) ротор массивный, гладкий: $s_k = 1.4$ о.е., $s_{A0} = 0.9$ о.е., $P_m = 1.2$ о.е.

Согласно формуле (1) имеем:

- $\beta_{1A} = 15.62$ о.е. для массивного ротора с к.з. клеткой;

- $\beta_{1A} = 1.71$ о.е. для массивного гладкого ротора.

Эти сведения весьма важны и позволяют отметить следующее: у агрегата с АТГ с массивным ротором любой конструкции значение коэффициента саморегулирования существенно больше, чем в агрегате с синхронным турбогенератором, и поэтому справедливо неравенство

$$\beta_{1A} > \beta_{1C},$$

В случае АТГ, изменяя конструкцию ротора, в частности, укладывая в него медные короткозамкнутые клетки, можно изменять крутизну характеристики $M = f(s)$, показанной на рис. 1.

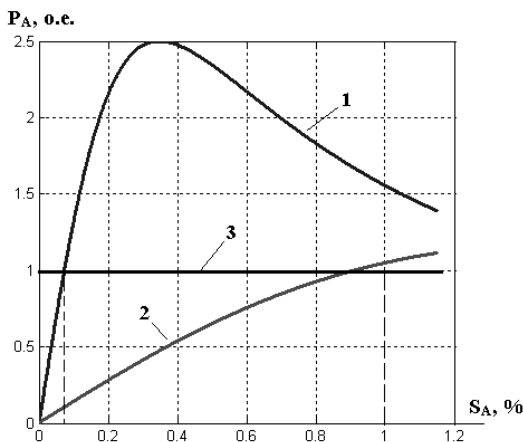


Рис. 1. Моментная характеристика АТГ с массивным ротором: 1 – ротор с медной к.з. клеткой; 2 – ротор гладкий; 3 – момент турбины

При этом значения номинального и критического скольжения уменьшаются, что также повышает эффективность работы АТГ в составе электрических систем.

Библиографический список

1. **Теория** и методы расчета асинхронных турбогенераторов / Постников И.М., Новиков А.В., Прокофьев Ю.А. [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.

2. **Аллаев К.Р.** Режимы электрических систем с асинхронными турбогенераторами. – Ташкент: ТГТУ, 2005. – 287 с.

Т.Ф. Махмудов, ст. преп.
(ТашГТУ, г. Ташкент)

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СИНХРОННОМ И АСИНХРОННОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

Создание надежных и экономичных источников активной мощности – один из определяющих моментов в комплексе задач повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем. Асинхронные турбогенераторы (АТГ) без традиционных обмоток на роторе со статорным возбуждением – массивный ротор с беличьей клеткой в значительной степени соответствуют этим требованиям [1]. АТГ из-за отсутствия систем возбуждения и бандажей конструктивно проще, надежнее синхронных турбогенераторов (СТГ) соответствующей мощности. В двухполюсном исполнении они могут быть изготовлены на единичную мощность, большую, чем СТГ. Известно, что условия развития ЭЭС практически не налагают ограничений на наибольшую мощность агрегата и станций при обеспечении их соответствующей надежности.

Несимметричные короткие замыкания – наиболее частый вид аварий как в генераторах, так и в сетях электрических систем. Они опасны появлением в генераторах ударных токов и знакопеременных электромагнитных моментов, по величине превосходящих аналогичные режимные параметры при трехфазных коротких замыканиях. При определенных видах несимметричных коротких замыканий возможны перенапряжения на свободной фазе и возникновение резонансных явлений на частотах, отличных от номинальной.

В случае несимметричных коротких замыканий решение дифференциальных уравнений генераторов относительно токов вносит в результаты расчета погрешность, причем ее величина тем больше, чем больше несимметрия со стороны статора и ротора. В связи с этим дифференциальные уравнения решаются относительно потоков машин, поскольку они слабо реагируют на пульсации токов основной и высоких частот [2].

Для схемы простейшей электрической системы (рис. 1) проведем опыт моделирования двухфазного короткого замыкания и сравним характеристики токов короткого замыкания. Мощности электрических машин выберем одинаковыми – 200 МВт. Продолжительность короткого замыкания составляет 0.2 с.

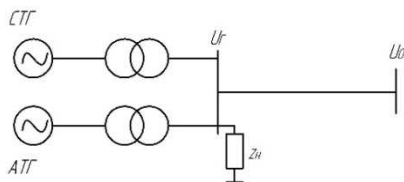


Рис. 1. Схема электрической системы

Сопоставление полученных кривых токов короткого замыкания (рис. 2) показывает, что ударные значения токов значительно отличаются.

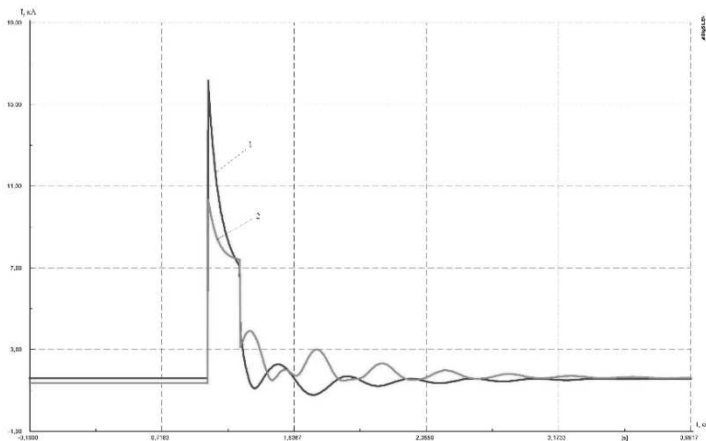


Рис. 2. Осциллограммы токов короткого замыкания при двухфазном коротком замыкании на шинах генераторов: 1 – СТГ, 2 – АТГ

В зависимости от конструкции массивного ротора асинхронного турбогенератора кратности ударных значений параметров режима, возникающих при различных видах короткого замыкания, на 15 – 40 % меньше, чем в синхронном турбогенераторе аналогичной мощности [3].

Библиографический список

1. Аллаев К.Р. Режимы электрических систем с асинхронными генераторами. – Т.: Fanvatexnologiya larmarkazingbosmaxonasi, 2005. – 287 с.
2. Аллаев К.Р., Мирзабаев А.М. Матричные методы анализа малых колебаний электрических систем. – Т.: Fanvatexnologiya, 2016. – 432 с.
3. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов / Постников И.М., Новиков А.В., Прокофьев Ю.А. [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.

Н.Н. Петров, маг.;
рук. Г.А. Евдокунин, д.т.н., проф.
(СПбПУ, г. Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОВТОРНЫХ ЗАЖИГАНИЙ ДУГИ В ВАКУУМНОМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СЕТИ 35 КВ

Актуальность проблемы связана с недавним внедрением вакуумных выключателей (ВВ) на напряжение 35 кВ и отсутствием единой точки

зрения об их поведении в сети [1 – 5]. Ставилось целью создать компьютерную модель с использованием современного программного обеспечения для выяснения причин повреждений и предложения защитных мероприятий.

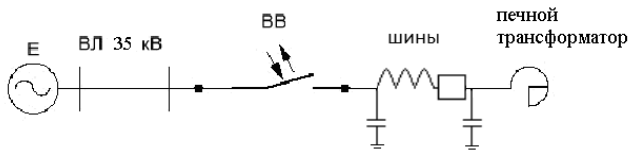


Рис. 1. Схема снабжения печного трансформатора 35 кВ

В программном комплексе ЕМТР/АТР была смоделирована электрическая сеть, в которой в процессе отключения печного трансформатора на холостом ходу (а также при нагрузке) произошло повреждение ВВ. На рис. 1 представлена схема сети 35 кВ. В процессе отключения на контактах вакуумного выключателя происходит интенсивный переходный процесс (рис. 2).

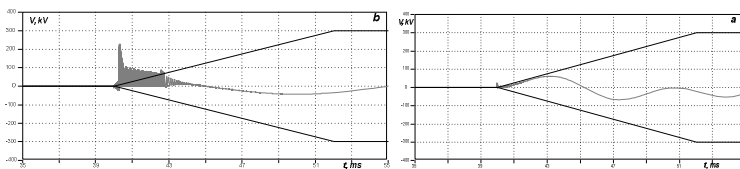


Рис. 2. Межконтактное напряжение на отключаемой фазе выключателя: а – без защитных устройств, б – при установке импульсного конденсатора 0,2 мкФ

На рис. 2 показаны огибающие кривые диэлектрической прочности вакуумного промежутка и кривая переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН). Превышения ПВН уровня диэлектрической прочности приводит к пробое вакуумного промежутка и повторному зажиганию дуги (рис. 2, а).

Для устранения многократных повторных зажиганий дуги в ВВ и сопровождающих их перенапряжений была установлена емкость 0,2 мкФ (соединение по схеме звезда с изолированной нейтралью) около печного трансформатора. Из рис. 2, б видно, что несмотря на достаточно высокое значение амплитуды первого колебания восстанавливающегося напряжения, снижение частоты его изменения позволит избежать повторных зажиганий дуги, а, следовательно, и перенапряжений при отключении тока ХХ печного трансформатора в неблагоприятный момент времени.

По результатам расчетов были сделаны выводы, что причиной возникновения перенапряжений являются повторные зажигания дуги в ВВ,

возникающие при начале движения его контактов вблизи нуля тока промышленной частоты. Единственным средством, обеспечивающим снижение перенапряжений и исключения опасных повторных зажиганий дуги, является установка импульсного конденсатора рядом с коммутируемым элементом. Разные схемы электроснабжения, рассмотренные в этом исследовании и в [2], приводят к различному механизму образования опасных перенапряжений для вакуумного выключателя 35 кВ, однако во всех случаях источником перенапряжений является механизм повторных зажиганий дуги.

Библиографический список

1. **Евдокунин Г.А.**, Тилер Г. Современная вакуумная техника для сетей среднего напряжения. – СПб., 2007.
2. **Повторные** зажигания дуги в вакуумном выключателе при отключении шунтирующих реакторов в сети 35 кВ / Г.А. Евдокунин, Н.Н. Петров, Е.Б. Шескин // Электро. – 2016. – № 1.
3. **Safe** implementation of HV vacuum switches in oil & gas installations / J. Tastet, Ph. Angays // Electrical and Instrumentation Applications in the Petroleum & Chemical Industry, 2007. PCIC Europe 2007. 4th European Conference. – 2007. – P. 7.
4. **Phenomena** and Mechanism Analysis on Overvoltages Caused by 40.5-kV Vacuum Circuit Breakers Switching Off Shunt Reactors / N. Du, Y. Guan, J. Zhang, ets. – IEEE transactions on power delivery. – 2011. – Vol. 26. – No. 4.
5. **Overvoltages** and reignition behavior of vacuum circuit breaker / S.M. Wong, L.A. Snider, E.W.C. Lo // International Conference on Power Systems Transients. – IPST 2003 in New Orleans, USA.

*Е.А. Комаров, А.А. Струцкий, магистранты;
рук. А.А. Гилёв, к.т.н., доц.
(СГУ, г. Севастополь)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ГАШЕНИЯ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В АППАРАТАХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Отключение нагрузки в силовых цепях постоянного тока является проблемной операцией по сравнению с аналогичным процессом, характерным для переменного тока. Это обусловлено тем, что на переменном токе ток периодически проходит через нулевое значение, что значительно облегчает процесс дугогашения. На практике наиболее распространённым способом гашения дуги постоянного тока является её выдувание магнитным полем на дугогасительную решётку, разбивающую тело дуги на множество малых дуг, каждая из которых требует для своего горения определённой разности потенциалов (обычно в пределах 60 Вольт). Если суммарное напряжение на всех элементах решётки превышает напряже-

ние сети, то дуга гаснет. У этого способа есть ряд недостатков. Во-первых, элементы решётки, представляющие собой стальные омеднённые пластины, достаточно быстро обгорают и приходят в негодность. Во-вторых, выдувание дуги из межконтактного промежутка производится автодутьём, то есть отключаемым током, пропускаемым через специально предназначенную для этого катушку. При небольшом отключаемом токе эффект магнитного дутья резко снижается, и дугогашение становится затруднительным. Кроме того, при средних напряжениях габариты дугогасительного устройства имеют непомерно большие массогабаритные показатели, как показано на рис. 1.

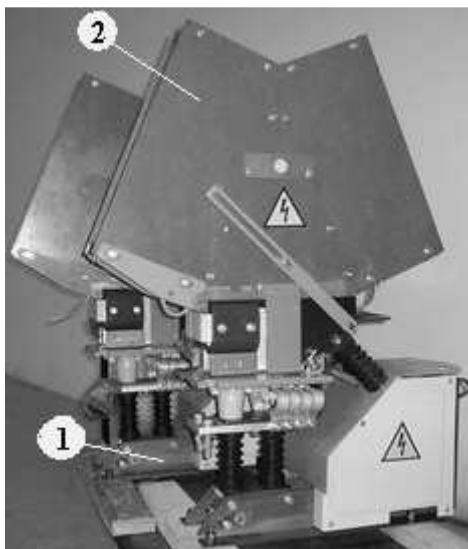


Рис. 1. Внешний вид выключателя постоянного тока типа ВАБ-49: 1 – привод выключателя; 2 – дугогасительная камера с габаритами 780×550 мм

На кафедре Судового электрооборудования Севастопольского государственного университета получен патент на способ гашения дуги постоянного тока [1], в котором указанная задача решается с помощью введения в межконтактный промежуток двухслойной пластины, изолирующей слой которой обращён к нагрузке, а проводящий к источнику. Пластина имеет электрический контакт со встречно заряженным по отношению к основным контактам конденсатором, что ведёт к быстрому гашению дуги и минимальным перенапряжениям.

На рис. 2 показана электромеханическая схема, реализующая описанный выше способ отключения постоянного тока.

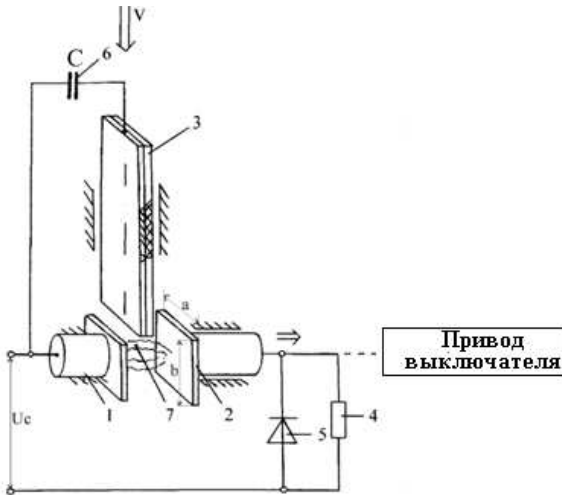


Рис. 2. Схема предлагаемого способа гашения дуги постоянного тока: 1 – неподвижный контакт; 2 – подвижный контакт; 3 – двухслойная пластина; 4 – нагрузка; 5 – гасящий встречно включенный диод; 6 – конденсатор

Схема работает следующим образом. При необходимости отключения силовой цепи подвижный контакт 2 перемещается в сторону, противоположную неподвижному контакту 1 и между ними возникает дуга. В межконтактный промежуток на высокой скорости с помощью индукционно-динамического привода вводится подвижная пластина 3, рассекая тело дуги, заряды которой перетекают в конденсатор 6. При этом дуга гаснет. Энергия магнитного поля, накопленная в нагрузке 4, рассеивается через встречно включенный диод 5. Для замыкания цепи подвижная пластина 3 возвращается в исходное положение, после чего контакты 1 и 2 приводятся в соприкосновение.

Испытания схемы показали устойчивое гашение дуги постоянного тока при сравнительно небольших габаритах дугогасящего устройства. Кроме того было выяснено, что при прочих равных условиях увеличение линейной скорости ввода подвижной пластины 3 в межконтактный промежуток позволяет уменьшить ёмкость конденсатора 6 без ущерба качества отключения.

Преимущества предлагаемого дугогасительного устройства перед аналогичными серийно выпускаемыми заключаются в следующем:

1. меньшие массогабаритные размеры;
2. ремонтальность с меньшими материальными затратами;
3. повышенная электробезопасность при обслуживании из-за отсутствия последугового пламени.

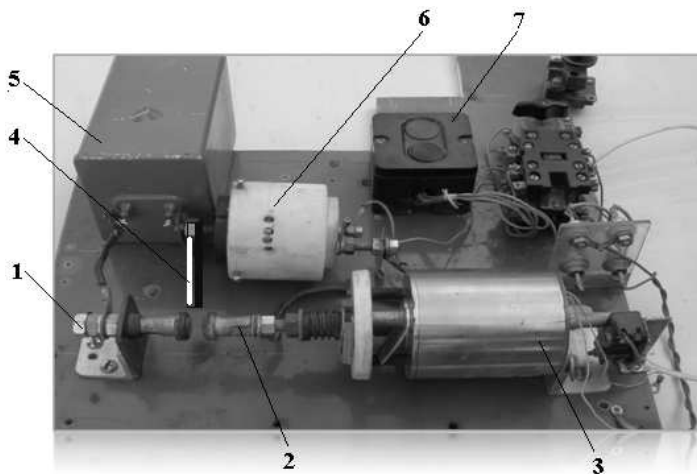


Рис. 3. Экспериментальная установка для испытания гашения дуги постоянного тока: 1 – неподвижный контакт; 2 – подвижный контакт; 3 – привод подвижного контакта; 4 – подвижная двухслойная пластина; 5 – гасящий конденсатор; 6 – привод пластины; 7 – кнопочный пульт управления

Применение таких дугогасительных устройств позволят значительно улучшить эксплуатационные качества коммутационных устройств постоянного тока, в особенности в системах управления подвижным составом.

Библиографический список

1. Пат. 59156А Украина, МКП⁷ H01H33/66. Способ коммутации силовых цепей постоянного тока больших мощностей. А.А Гилёв. – №2003032293; Заяв. 17.03.2003; Опубл. 15.08.2003, Бюлл. № 8.

Р.И. Саубанов, студ.;
рук. М.Ш. Гарифуллин, д.т.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

ПРОБЛЕМА НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РПН СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Анализ гистограмм распределения напряжения на шинах 10 кВ районных трансформаторных подстанций показывает, что без регулирования напряжения на них практически невозможно обеспечить приемлемый режим напряжения у потребителя. Одним из способов оперативного регулирования напряжения является изменение коэффициента трансфор-

мации трансформатора. Изменяется число витков в первичной или вторичной обмотке. Современные силовые трансформаторы оборудованы специальными устройствами, позволяющими добавлять или отключать необходимое количество витков. Уровень сложности такого регулирования при использовании переключателя витков зависит частоты применения, а также от функциональных особенностей трансформатора и его габаритов.

Изменение коэффициента трансформации осуществляется 2 способами с помощью ПБВ (переключение без возбуждения) на холостом ходу и с помощью РПН (регулирование под нагрузкой). У силового трансформатора должны быть предусмотрены соответствующие ответвления от витков, позволяющие менять их задействованное в процессе электромагнитной индукции количество. Тем самым, соответственно, меняя и коэффициент трансформации. И на данном этапе развития электроэнергетики существует проблема повреждения РПН.

Актуальность проблемы обусловлена тем, что РПН силовых трансформаторов – сложный и недостаточно надежный узел силового трансформатора. Согласно статистике, 35 – 60 % общих отказов трансформаторов связано с повреждением РПН.

Вариантом решения является замена существующих систем РПН тиристорными переключающими устройствами с вольтодобавочными трансформаторами (ТПУ с ВДТ), обеспечивающие изменение коэффициента трансформации с высоким быстродействием [1].

В рассматриваемой системе используется принцип геометрического сложения и вычитания векторов напряжения первичной обмотки силового трансформатора с векторами напряжения вторичной обмотки ВДТ. Вторичная обмотка ВДТ соединена по схеме «треугольник», включена в разрыв нейтральной точки обмотки ВН силового трансформатора. С помощью коммутаторов ТК1-ТК10 первичная обмотка ВДТ может быть соединена по схеме прямой или обратный треугольник, звезда с большим или малым коэффициентом трансформации (рис. 1).

В программном комплексе Mathcad было произведено технико-экономическое сравнение трансформаторов ТМН-1000/10 (<http://ru-transformator.ru/tmn-price/tmn-1000-35-10-536.html>) и ТМ-1000/10 (<http://ru-transformator.ru/tm-price/tm-1000-35-10-102.html>) с ТПУ ВДТ [2]. Стоимость вспомогательного трансформатора 350 тыс. рублей. Выбрали тиристоры для регулирования напряжения Т161-200. В количестве 32 шт., цена за штуку 780 рублей (<http://bizorg.su/komplektuyushtie-i-materialy-dlya-elektroniki-obshtee-r/p124144-t161160-t161200-tiristor>).

В результате было выявлено, что стоимость ТМ-1000/10 с ТПУ ВДТ ниже стоимости ТМН-1000/10 на 15 %. Так же надо учесть, что изменение коэффициента трансформации в ТПУ с ВДТ происходит без образования электрической дуги, увеличивается срок службы трансформатора.

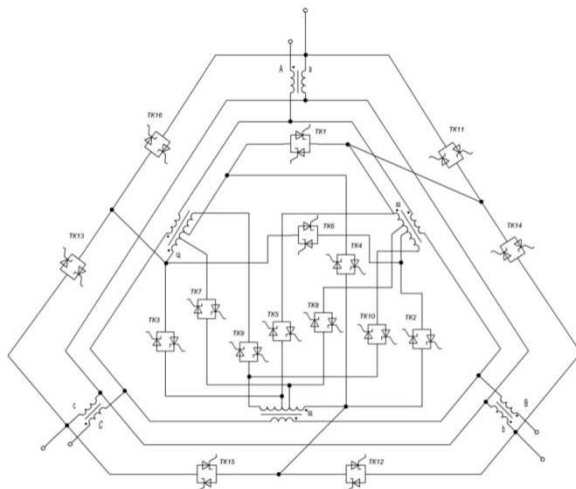


Рис. 1. ТПУ с ВДТ: ТК1 – ТК16 – тиристорные ключи

Перспективой данной темы является решение проблем повреждаемости РПН путём использования другого принципа регулирования, используя полупроводники и вспомогательный трансформатор.

Библиографический список

1. **Туманов И.М.**, Алтунин Б.Ю. Тиристорные и тиристорно-контактные установки для стабилизации и регулирования параметров электроэнергии: учеб. пособие. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 1993.
2. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

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

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ АНАЛИЗА ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА

Надежность работы электростанций в значительной мере зависит от надежности ее системы собственных нужд. Одной из причин вынужденных остановов блоков из-за отказов вспомогательного оборудования на станциях является отказ высоковольтных электродвигателей.

На пылеугольных станциях и специальных комбинатах по переработке угля широко применяются молотковые и среднеходовые мельницы и дробилки. На данных механизмах используются высоковольтные короткозамкнутые асинхронные двигатели (АД), которые работают с тяжелыми условиями пуска и поэтому имеют высокие значения интенсивности отказов. Одним из слабых узлов таких электродвигателей является короткозамкнутая обмотка ротора (ОР), которую называют также «беличья клетка». Наиболее характерные в практике эксплуатации повреждения «беличьих клеток» заключаются в обрывах стержней, которые составляют более 80 % от общего числа повреждений ОР. Поэтому контроль состояния короткозамкнутых ОР мощных АД является актуальной задачей.

В настоящее время выявление повреждений короткозамкнутой ОР производится во время ремонтов. Большая периодичность ремонтов не позволяет своевременно определить возникшие неисправности в ОР, что часто приводит к работе электродвигателя с оборванными стержнями. При этом повышается вибрация элементов АД, что может вызвать повреждение подшипника, на АД с прямоугольными пазами ОР возможно повреждение лобовых частей обмоток статора отогнутым концом стержня ротора и др.

Существующие методы оперативного контроля текущего состояния ОР в условиях эксплуатации АД не нашли широкого применения. Это объясняется тем, что разработанные на их базе устройства имеют недостаточную чувствительность к обрыву одного стержня, а также достоверных критериев перехода ОР из работоспособного исправного в работоспособное неисправное состояние и из последнего в неработоспособное.

Для решения проблемы своевременного выявления неисправностей АД предлагается метод контроля состояния стержней ротора по внешнему магнитному полю, отличающийся от остальных по следующим параметрам:

- отсутствие вмешательства в конструкцию электродвигателя и, следовательно, электробезопасность;
- более высокая точность диагностики;
- лёгкость доступа к ДС (возможно снятие ДС без физического контакта).

Одной из сложностей реализации этого метода является создание средств анализа диагностического сигнала, способных определить переход двигателя из работоспособного исправного в работоспособное неисправное состояние и из последнего в неработоспособное.

В качестве средства реализации был выбран программный пакет MATLAB, как наиболее приспособленный к проведению математическо-

го анализа. За основу взяты алгоритмы, изложенные в работах [2], [3] и выделены в отдельные библиотеки с целью упрощения разработки.

Необходимые для анализа исходные данные:

- запись диагностического сигнала в формате wav или txt;
- частота дискретизации записанного сигнала (для формата txt);
- время начала сигнала;
- длительность сигнала;
- число пар полюсов двигателя;
- номинальное скольжение двигателя;
- коэффициент трансформации АЦП;
- коэффициент передачи датчика.

Результатом работы программы является отчёт, включающий в себя амплитуды и частоты гармоник фиктивных обмоток ротора (ФОР, см. [1]), также возможен вывод удельной средней мощности сигнала и других характеристик, на основе которых возможно сделать заключение о работоспособности ЭД.

После определения точных критериев перехода в неисправное состояние данная система позволит гарантированно выявлять одиночные обрывы стержней ротора и в большинстве случаев – множественные обрывы.

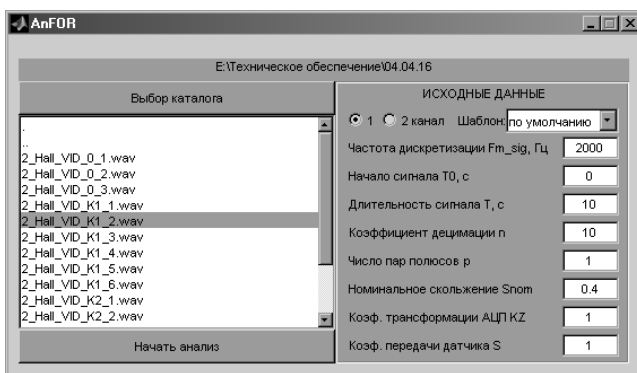


Рис. 1. Пользовательский интерфейс анализатора

Библиографический список

1. **Скоробогатов, А.А.** Математическая модель магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни // Повышение эффективности работы энергосистем // Труды ИГЭУ. – Вып. 7. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – С. 302 – 310.
2. **Скоробогатов, А.А.** Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора стержни / А.А. Скоробогатов // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 2. – С. 75 – 78.
3. **Разработка** метода автокоррекции времени записи при спектральном анализе сигналов / Е.М. Новоселов [и др] // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 5. – С. 29 – 37.

В.А. Гаврилов, студ.;
рук. Н.Б. Ильичев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОВОДОВ И ТРОСОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Метод механического расчета, именуемый «классическим», разработан в 50 – 60-е годы [1 – 3] и используется в настоящее время. Он позволяет определять стрелы провиса и напряжения проводов и тросов воздушных линий при различных климатических условиях.

Данный метод достаточно прост, однако имеет несколько существенных недостатков. В нем используется линейная упругая модель, провода в которой моделируются, как линейные пружины с одним модулем упругости и одним коэффициентом теплового расширения. В действительности, как показывают эксперименты [4], провода имеют нелинейное поведение, которое описывается полиномами 4-й степени, а кривая провисания имеет форму цепной линии, в отличие от аппроксимирующей ее квадратичной параболы, которая используется в «классическом» методе. Кроме этого, в нем не учитываются пластические деформации проводов, которые возникают, как при монтаже, так и при эксплуатации линии электропередач (ЛЭП).

Поэтому, данный метод не дает точных результатов при проектировании ЛЭП с использованием обычных АС-проводов, а особенно проводов нового типа (высокотемпературных, с малой стрелой провиса и гар-проводов).

Целью данной работы является разработка метода механического расчета с учетом недостатков «классического» метода. В качестве расчетной, принимается модель, описывающая деформацию провода как функцию от натяжения, температуры и времени [4].

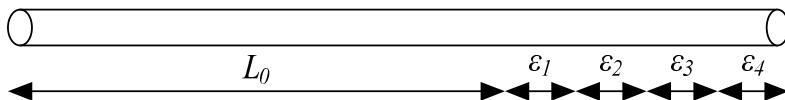


Рис. 1. Удлинение провода под нагрузкой: L_0 – начальная длина провода; ε_1 – упругая деформация вследствие изменения натяжения провода; ε_2 – упругая деформация вследствие изменения температуры провода; ε_3 – пластическая деформация вследствие приложения нагрузки (остаточное удлинение); ε_4 – пластическая деформация вследствие ползучести

Учет пластических деформаций позволяет существенно улучшить точность определения стрелы провеса и напряжения провода, поскольку пластические деформации наблюдаются при монтаже, а затем в течении всей продолжительности эксплуатации ЛЭП и могут приводить к существенному увеличению длины провода [5], а как следствие и нарушению допустимых габаритов.

Уравнение состояния провода с учетом пластических деформаций в исходном виде выглядит следующим образом:

$$L_{\text{пров}} = L_0(1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4).$$

Предложенный метод основывается на графическом методе [6], используемом в большинстве компьютерных программ, и методе суммирования деформаций [7]. В графическом методе используются экспериментальные диаграммы «напряжения-деформация» сердечника и внешнего материала, представленные полиномами 4-й степени для «исходного» и «после ползучести» состояний. Метод суммирования деформаций позволяет определить каждое удлинение провода отдельно и далее сложить, чтобы получить общее удлинение.

Предложенный метод расчета позволяет рассматривать независимые состояния сердечника и внешнего материала провода. На основании этих данных определяются натяжения в обеих частях провода, и находится точка-перегиба температуры, в которой вся нагрузка принимается только сердечником. Точка-перегиба является ключевым понятием, отличающим поведение высокотемпературного провода.

В результате проведенной работы был разработан алгоритм расчета стрел провеса и напряжений провода, в зависимости от нагрузки, температуры и времени, на разных стадиях эксплуатации ЛЭП. Алгоритм реализован в программном комплексе Energy CS.

Библиографический список

1. **Глазунов А.А.** Основы механической части воздушных линий электропередачи. Т. 1. Работа и расчет проводов и тросов – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. –192 с.
2. **Бошнякович А.Д.** Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. –255 с.
3. **Бошнякович А.Д.** Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. – Л.: Энергия, 1971. –255 с.
4. **CIGRÉ B2-12 Brochure (Ref. No. 324),** Sag-tension calculation methods for overhead lines, 2007.
5. **Временные** руководящие указания по расчету монтажных напряжений и стрел провеса проводов и тросов воздушных линий электропередачи с учетом остаточных деформаций. Т. 1. Пояснительная записка. Инв. № 3471-тм-т2. – Ташкент, 1976.
6. **Varney T.** Graphic method for sag-tension calculations for ACSR and other conductors. – Alcoa, 1926.
7. **A new computer model of ACSR conductors / J.S. Barrett, S. Dutta, O. Nigol.** – IEEE Trans. Power App. Syst. – Vol. PAS-102 n. 3, 1983. – Pp. 614 – 621.

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

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ДЕЛИТЕЛЬНАЯ АВТОМАТИКА НА ТЭС

Возникающие на электростанциях короткие замыкания, отключения сборных шин, повреждения оборудования, отключения электростанций от энергосистемы могут приводить к перегрузке оставшегося в работе оборудования, к нарушению синхронной работы генераторов, к аварийному повышению или понижению частоты и напряжения. Наиболее часто последние возникают при недостаточной пропускной способности линий электропередачи и недостаточной резервной мощности генераторов. Для предотвращения развития аварий непрерывно совершенствуется система многоуровневой иерархической противоаварийной автоматики, имеющая:

- уровень электроэнергетической системы в целом(ЕЭС);
- уровень объединённой системы(ОЭС);
- уровень района противоаварийного управления;
- уровень противоаварийной автоматики на станции.

Система ПА действует при больших аварийных возмущениях с целью предотвращения нарушения параллельной работы генераторов, недопустимого отключения частоты и напряжения от номинальных значений, предотвращает развитие повреждений в общесистемные аварии, сопровождающиеся прекращением электроснабжения потребителей на большой территории. Действия направлены на восстановление баланса между генерируемой и потребляемой мощностями путём разгрузки турбин, отключения части нагрузки в дефицитной части энергосистемы, отключения части генераторов в избыточной части системы, деления системы в специально предназначенном для этого сечении и т.д.

Системами автоматики по отраслевым директивным материалам оснащаются практически все тепловые электростанции. Основное назначение делительной автоматики по частоте – сохранение в работе собственных нужд и предотвращении полного останова электростанций при отказе или недостаточной эффективности действий устройств АЧР, обеспечение питания наиболее ответственных потребителей и создание условий для скорейшего восстановления работы энергосистемы после ликвидации аварий.

При автоматическом выделении СН ТЭЦ при аварийном снижении f частоты делительная автоматика должна реагировать на снижение частоты и(или) скорость её снижения, на факторы, непосредственно свидетельствующие о возникновении дефицита мощности (отключение питающих элементов сети, линий связи ТЭЦ с ЭЭС, сброс активной мощности и т.д.). При этом выделении СН осуществляется при соблюдении

баланса мощностей в выделенной части ЭЭС с учётом действий АЧР в отделиваемой сети.

Для анализа эффективности и принципов работы автоматики все ТЭС разделены на следующие типы:

- ТЭС с поперечными связями по пару большой и средней мощности;
- ТЭС с поперечными связями по пару малой мощности (блок-станции с суммарной мощностью до 200 МВт и с агрегатами – 30 МВт и ниже);
- комбинированные ТЭС, имеющие агрегаты с блочной компоновкой и с поперечными связями по пару.

Анализ принципов работы делительной автоматики на 270 ТЭС семи энергообъединений показывает, что на станциях разных типов в наименьшей степени устройства делительной автоматики по частоте оснащены блочные ТЭС (оснащенность 60 %). Объясняется это объективными трудностями внедрения устройств автоматики на этих электростанциях, а именно:

-подавляющее большинство блочных ТЭС выдают мощность в энергосистему при малой местной нагрузке прилегающих районов. В этих условиях появляется возможность расширения зон делительной автоматики;

-процесс выделения одного блока на нагрузку собственных нужд с последующей глубокой нагрузкой на большинстве электростанций не автоматизирован – или автоматизирован слабо. Принцип делительной автоматики по частоте применяемый на блочных и комбинированных ТЭС, реализуется отделением одного (реже двух) блоков на нагрузку района.

На ТЭС с поперечными связями большой и средней мощности при отделении всей или части станции используют отделение агрегата только на собственные нужды. На маломощных ТЭС применяется выделение только всей или части станции на сбалансированную нагрузку

Библиографический список

1. **Алгоритм** действия частотно-делительной автоматики / С.Б. Гришин, В.А. Савельев // Энергия-2010: мат. пятой регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Т. 3. – Иваново, 2010. – С. 198 – 200.

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

ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ТОКОВ ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ШЕСТИФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

Генератор ТЗВ-1200-2УЗ называют шестифазным т.к. у данного генератора с целью снижения объема тока в пазу и улучшения электромаг-

нитных характеристик машины применена шестифазная статорная обмотка, образованная из двух трехфазных, сдвинутых относительно друг друга на 30 электрических градусов.

При наличии коммутационных аппаратов между генератором и трансформатором турбогенератор может работать как с обеими, так и с любой одной обмоткой статора при активной мощности соответственно 1200 и 600 МВт. Применение высоковольтных генераторных выключателей приводит к ряду режимных особенностей. Возникает вопрос о способе включения генератора на параллельную работу с системой.

Возможны следующие варианты включения генератора на параллельную работу:

1. Включение генератора на полную мощность выключателем на стороне высокого напряжения блочного трансформатора;
2. Включение одной обмотки в сеть при разомкнутой второй обмотке;
3. Включение одной обмотки в сеть при работающей второй обмотке.

Составим обобщенную схему замещения блока в момент включения генератора на параллельную работу (рис. 1).

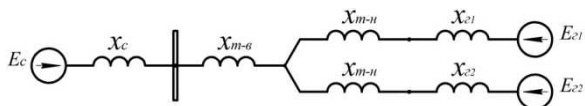


Рис. 1. Схема замещения

В момент включения генератора на параллельную работу его представляют сверхпереходными параметрами. В связи с особенностями конструкций данного генератора, а именно наличием второй трехфазной системы, расчет сверхпереходного сопротивления по продольной оси для первой обмотки трёхфазной системы имеет вид:

$$x_{d1}'' = x_{\sigma 1} + x_{\sigma 11} + \frac{x_{\sigma 1} + x_{\sigma 11} - x_{\sigma 12}}{x_{\sigma 2} + x_{\sigma 11} - x_{\sigma 12}} x_{\sigma 12} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x_{\sigma 1} + x_{\sigma 11} - x_{\sigma 12}}{x_{\sigma 2} + x_{\sigma 11} - x_{\sigma 12}} \right) \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fd}} + \frac{1}{x_{kd}}}.$$

Наименование сопротивлений указаны в [1].

После затухания аperiодического тока ротора, поток реакции якоря частично проходит через ротор, поэтому проводимость для потока возрастает, поэтому принимаем $x_{kd} = \infty$.

В случае отключенного одного из выключателей (при разомкнутой одной из трехфазных систем $x_{\sigma 2} = \infty$):

$$x_{d1}'' = x_{\sigma 1} + x_{\sigma 11} + \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fd}} + \frac{1}{x_{kd}}}.$$

Для расчета ЭДС генератора принимаем, что режим предшествующий включению выключателя номинальный:

$$E_{z1} = 1 + x_{z1} \cdot \sin \varphi .$$

Результаты расчета сведены в таблицу.

Таблица 1. Результаты расчета

Способ включения генератора	Значение тока, о.е.
Включение генератора на полную мощность выключателем на стороне высокого напряжения блочного трансформатора	4,69
Включение одной обмотки в сеть при разомкнутой второй обмотке	2,61
Включение одной обмотки в сеть при работающей второй обмотке	4,21

По результатам расчета видно, что включение одной обмотки при работающей второй ведет к снижению уровня толчкового тока на 9 %. Следует отметить, что ток, протекающий по обмотке статора при включении генератора с разомкнутой второй обмоткой на 11 % больше, это объясняется законами электродинамики.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.
2. Хуторецкий Г.М., Воронов Г.Г. Шестифазные турбогенераторы // Электросила. – 1970. – № 28. – С. 33 – 40.
3. Гришин Н.В. Уравнение режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности // НТВ СПбГУ. – 2016. – № 2 (243). – С. 16 – 23.
4. Галишников Ю.П., Исенбаев Т.А. Последовательные короткие замыкания в турбогенераторе ТВВ-1200-2 // Электрические машины. – 1980. – Вып. 5 (III). – С. 1 – 3.

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

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО ЗНАЧЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Сокращение инвестиций в строительство, реконструкцию и техническое перевооружение электрических сетей и станций в последнее десятилетие привело их к резкому старению. Продление их эксплуатации после нормативного срока службы является общемировой тенденцией. Для их надежной работы в этих условиях важно своевременно и четко организовать их обслуживание, а также своевременно выявлять и устранять де-

фекты на ранней стадии. Практика показывает, что большинство трансформаторов, которые подверглись диагностированию, могут работать до сорока лет, без их ремонта.

Доля технологических нарушений, приходящаяся на силовые трансформаторы и автотрансформаторы, составляет около 42 %. Поэтому внедрение средств мониторинга и диагностирования их технического состояния является важнейшей задачей в энергосистемах и промышленных сетях [1].

Большая часть отмеченных технологических нарушений связана с повреждениями маслонаполненных вводов, обмоток и устройств регулирования.

Одной из актуальных проблем, возникающих при эксплуатации, является своевременное обнаружение деформации обмоток мощных силовых трансформаторов, вызванных внешними короткими замыканиями, перегрузками в линиях или резкими изменениями нагрузок.

Трансформаторы с деформированными обмотками могут продолжать работать длительное время (от 5 до 6 лет), но если нагрузка трансформатора будет близка к предельной, то отказ произойдет быстро. Таким образом, своевременное выявление таких повреждений на стадии зарождающегося дефекта и позволяет предотвратить аварийные ситуации в электрических сетях и на подстанциях.

Деформации обмотки изменяют собственные и взаимные индуктивности ее элементов. Это приводит к тому, что изменяется сопротивление короткого замыкания Z_k . У неповрежденного трансформатора значения Z_k отдельных фаз не должны отличаться. А их превышение более чем на 2,5 – 3 % от первоначальных значений указывают на недопустимые деформации обмоток.

В настоящее время величина Z_k определяется в процессе испытания трансформатора, для чего он выводится из эксплуатации, что приводит к ущербу или уменьшению надежности электроснабжения.

В докладе рассматривается метод контроля полного сопротивления короткого замыкания Z_k в режиме мониторинга, т.е. без вывода трансформатора из работы.

Проводимые исследования направлены на выбор параметров контроля при мониторинге, обладающих достаточной информативностью для оценки механического состояния обмоток. А также на разработку алгоритма мониторинга, позволяющего выполнить программную реализацию метода в составе АСУ ТП подстанции. Что позволит осуществлять контроль за состоянием обмоток силовых трансформаторов в режиме реального времени, без отключения от сети.

Алгоритм включает в себя ввод значения напряжения первичной и вторичной обмоток, тока во вторичной обмотке, его частоты и расчет индуктивного сопротивления трансформатора. Измеряемые параметры поступают на вход блока математической обработки результатов измере-

ний, внутри которого производится расчет. Значение индуктивного сопротивления короткого замыкания трансформатора, приведенное к частоте 50 Гц, вычисляется по формуле:

$$X_i^{50} = \frac{50}{F_i \cdot I_i^2} \cdot \sqrt{(I_i \cdot U_i)^2 - P_i^2},$$

где I_i , U_i , P_i , F_i – значения параметров тока, напряжения, мощности и частоты, измеренные в i -м отсчете.

Измеряемые параметры масштабируются, оцифровываются и в блоке рассчитывается их индуктивное сопротивление. Полученное значение сравнивается с допустимым значением. Определяется его отклонение. И по полученной величине отклонения делается заключение о состоянии обмоток трансформатора.

Решение данной задачи в составе АСУ ТП позволит контролировать состояние обмоток силового трансформатора в режиме мониторинга, значительно сократит трудовые и материальные затраты, снизит время простоя трансформатора и повысит надежность работы подстанции и электроснабжения потребителей.

Библиографический список

1. Оценка состояния и способы продления срока службы силовых трансформаторов / Сماعيلов В.В., Долин А.П., Першина Н.Ф., Тармогин П.В. // Современные методы и средства оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации высоковольтного оборудования энергосистем. – М., 2001. – С. 1 – 8.

С.А. Пещерова, студ.;
рук. А.В. Рассказчиков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Эффективность функционирования электротехнического оборудования электростанций, подстанций, электрических сетей и систем электроснабжения связана с его техническим состоянием.

Высоковольтные выключатели являются одним из основных типов электротехнического оборудования, применяемого в распределительных устройствах станций и подстанций. С помощью них производятся включения и отключения цепи в различных режимах: длительная нагрузка, перегрузка, короткое замыкание, холостой ход, несинхронная работа. Поэтому высокая надежность выключателя во всех эксплуатационных режимах – его основное достоинство. В современных условиях, когда износ основных производственных фондов электроэнергетической отрасли

ли превышает 50 %, проблема обеспечения безотказной работы высоковольтных выключателей является особенно актуальной.

Контроль состояния выключателей может осуществляться как во включенном их положении, так и в отключенном. При использовании системы ремонтов по техническому состоянию, целесообразнее рассматривать контроль эксплуатационных характеристик, то есть тех, которые контролируются в период работы выключателя. Это ресурсные параметры выключателя:

- механическая стойкость выключателя, определяется числом циклов включения и отключения тока, который не превышает номинального значения;
- ресурс по коммутационной стойкости, определяется числом циклов отключения при номинальном токе отключения.

Как коммутационный, так и механический ресурс подразделяются на начальный, сработанный и остаточный. Данные по начальному ресурсу отражены в специализированной нормативно-технической документации, поставляемой с конкретным выключателем. Сработанный ресурс отражает степень износа деталей и узлов конкретной единицы оборудования. Под сработанным коммутационным ресурсом для выключателя понимают степень износа дугогасительной камеры, которая определяется числом отключений тока КЗ. Под остаточным ресурсом понимают остаток ресурса выключателя после определенного периода эксплуатации и числа операций по отключению и включению нагрузочных токов и токов КЗ [1]. На практике необходимо знать вероятность отказа выключателя при отключении (включении) им тока.

Техническая диагностика выключателей требует измерения большого числа параметров. Так, например, общими для всех типов выключателей являются следующие диагностические испытания: определение состояния изоляции, контактной системы, привода, проверка минимального напряжения питания, многократное опробование, тепловизионный контроль. Кроме того, для каждого отдельного типа выключателя имеются свои дополнительные испытания.

Среди многочисленных технических параметров особое значение имеют временные параметры контактной системы и скоростные характеристики подвижных частей [2]. Качество работы контактной системы выключателей определяет в первую очередь совокупность следующих основных временных параметров: время включения и отключения, разновременность включения фаз, длительность и характер дребезга контактов. Эти параметры должны строго контролироваться в условиях эксплуатации на соответствие допустимым (нормируемым) значениям. Работа выключателя зависит от состояния его механических частей, правильности регулировок, настроек, степени износа, наличия развиваю-

щихся дефектов, точности изготовления деталей и качества сборки на заводе-изготовителе.

В настоящее время все чаще применяются инструментальные методы контроля состояния высоковольтных выключателей. На рынке КИПиА представлено большое количество средств измерений, отличающихся по своим техническим характеристикам и стоимостью, как российского, так и зарубежного производства. Наибольшее применение получили приборы: ПКВ/М7, ПКВ/М6Н, ПКВ/У3, которые не предусматривают специального обучения персонала, длительной настройки на объект при проведении измерений, позволяют получать готовый протокол измерений в цифровом виде на электронном табло или бумажном носителе [3].

Библиографический список

1. **Неклепаев Б.Н.**, Востросаблин А.А. Методика оценки остаточного ресурса выключателей при эксплуатации // Промышленная энергетика. – 1992. – № 10. – С. 31 – 32.
2. **Рассказчиков А.В.** Высоковольтные выключатели: метод. указания, Иван. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – 38 с.
3. **Темон.ру:** ООО «Техэлектромонтаж» [Электронный ресурс] // Обзор отечественных и импортных приборов для контроля высоковольтных выключателей. – Режим доступа: <http://www.temon.ru/node/1724>, свободный. – Загл. с экрана.

*А.С. Страхов, асп., Е.М. Новоселов, асс.,
Н.Н. Коновалов, студ.;*
*рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Хорошо известно, что асинхронные двигатели широко применяются в качестве приводов различных механизмов практически во всех отраслях промышленности. Отказ асинхронных двигателей может привести к тяжёлым последствиям для всего производственного процесса в целом. Поэтому разработка методов контроля технического состояния асинхронных двигателей является актуальной задачей.

С развитием компьютерной техники всё большее внимание уделяется такому методу выявления неисправностей асинхронных двигателей, как спектральный анализ сигналов, в качестве которых могут выступать ток статора, индукция внешнего и внутреннего магнитного поля и т.д. Этот метод основан на выявлении в спектре сигнала частот, резкое возрастание амплитуд которых характеризует наличие неисправности. Поэтому

необходимо разработать методику определения этих частот и их амплитуд в спектре сигнала. В ходе работы был разработан анализатор в программном комплексе Matlab, способный выявлять различные гармонические составляющие и определять их амплитуды.

Анализатор работает следующим образом: после регистрации сигнала и его оцифровки (с помощью АЦП) производится быстрое преобразование Фурье для получения частотного спектра. При определении амплитуд частотных гармонических составляющих большой проблемой является эффект растекания спектра, заключающийся в существенном уменьшении амплитуды определяемой гармоники и появлении других гармонических составляющих меньшей амплитуды. Для решения подобной проблемы был разработан метод автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС), суть которого заключается в последовательном уменьшении времени записи сигнала до таких значений, при которых эффект растекания спектра практически не проявляется, что позволяет с высокой точностью определять частоты и амплитуды искомым гармонических составляющих [1].

При большой амплитуде искомым гармоник метод АВЗС даёт высокую точность измерения. Однако данный метод может приводить к существенным ошибкам при поиске составляющих с малой амплитудой, особенно расположенных близко к основной гармонике (на частоте сети) или к гармоникам, частоты которых кратны частоте сети $f_i = i \cdot f_c$, где $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ – номер гармоники, f_c – частота сети, так как эти амплитуды этих гармоник могут быть значительно выше амплитуд искомым гармоник. При этом метод АВЗС может привести и к ошибочному выявлению совершенно другой гармонической составляющей. Для того чтобы избежать подобных эффектов, предлагается осуществлять фильтрацию как основной гармонической составляющей сразу после её определения по методу АВЗС, так и гармоник, частоты которых кратны частоте сети. Это позволяет существенно увеличить достоверность измерения частот и амплитуд остальных гармоник.

Эффективность работы данного анализатора спектра была проверена на сигналах внешнего магнитного поля двигателя ЗВР-71/2, которые обрабатывались в программном комплексе Matlab. Результаты исследования показали, что данный анализатор спектра с высокой точностью определяет амплитуды и частоты различных гармонических составляющих. Результаты работы позволяют говорить об эффективности разработанного анализатора спектра и возможности его применения для исследования спектров асинхронных двигателей.

Данный анализатор спектра может быть использован для решения различных задач при диагностике состояния асинхронных двигателей, таких как определение скольжения асинхронных двигателей по гармоникам.

кам эксцентриситета ротора [2] или зубцовым гармоникам ротора, выявление гармонических составляющих «фиктивной обмотки ротора», которые характеризуют наличие оборванных стержней обмотки ротора асинхронного двигателя и т.п.

Библиографический список

1. **Повышение** эффективности определения частотных составляющих при спектральном анализе сигналов / Назарычев А.Н., Скоробогатов А.А., Новоселов Е.М., Литвинов С.Н. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 29 – 37.

2. **Оценка** достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора / Назарычев А.Н., Страхов А.С., Новоселов Е.М. [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 3. – С. 44 – 51.

***Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов, ассистенты,
А.С. Страхов, асп.;
рук. А.А. Скоробогатов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)***

К ВОПРОСУ СУЩЕСТВОВАНИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Надежность работы тепловых электрических станций в значительной мере зависит от системы собственных нужд, где наибольшее применение нашли асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором. Учитывая высокую степень износа оборудования большинства тепловых электрических станций (включая АД), поддержание его безотказной работы становится весьма непростой задачей. Одним из путей повышения эксплуатационной надежности является функциональная диагностика, которая позволяет производить оценку технического состояния оборудования непосредственно во время его работы.

Одним из перспективных методов функциональной диагностики АД является контроль состояния по внешнему магнитному полю (ВМП). Однако из-за принятого в учебниках по электрическим машинам [1, 2] подхода, при котором магнитная проницаемость стали принимается равной бесконечности, распространено мнение, что из-за высокой магнитной проницаемости статора, магнитное поле за пределы корпуса АД не выходит, а если и выходит, то оно слишком слабо, чтобы зарегистрировать его с помощью доступных приборов.

С целью доказательства существования ВМП АД и возможности его легкого измерения был проведен эксперимент. Основным объектом исследования выступал маломощный АД с короткозамкнутым ротором типа ЗВР71-2. Для регистрации ВМП был использован распространенный и

недорогой датчик холла типа SS496A, производства компании Honeywell с чувствительностью порядка 4.5 мВ/Гс при напряжении питания 9 В. Регистрация ВМП производилась на корпусе АД.

На рис. 1 показана временная зависимость индукции ВМП на корпусе АД до и после включения электродвигателя (в точке А происходит включение электродвигателя). Данный рисунок убедительно доказывает, что ВМП работающего АД отчетливо выделяется на фоне шума.

На рис. 2 показан амплитудный спектр индукции ВМП работающего двигателя.

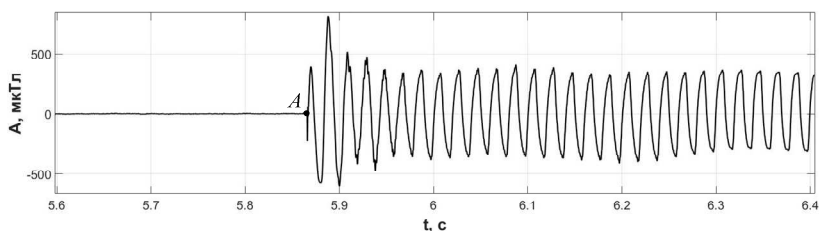


Рис. 1. Индукция на корпусе АД до и после включения электродвигателя

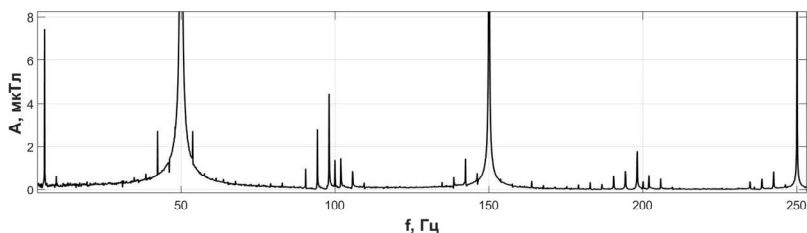


Рис. 2. Амплитудный спектр ВМП АД

Измерения показали, что для рассматриваемого АД значение наибольшей амплитуды гармоники, соответствующей частоте сети, находится в пределах 400 мкТл. При этом в спектре так же присутствуют все основные характерные гармоники, такие как гармоники эксцентриситета ротора или зубцовые гармоники ротора [3], которые также присутствуют в магнитном поле воздушного зазора АД. Амплитуды гармоник с частотой отличной от частоты сети колеблются в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков мкТл.

На основании этого можно предположить, что во ВМП, так же как и в магнитном поле воздушного зазора могут содержаться информативные составляющие, отражающие состояние АД. Поэтому ВМП АД должно быть исследовано с целью выявления характерных закономерностей (диагностических признаков), связанных с неисправностями узлов АД.

Библиографический список

1. **Вольдек, А.И.** Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – Изд. 3-е, перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: учебник для вузов. / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. **Геллер, Б.** Высшие гармоники в асинхронных машинах / Б. Геллер, В. Гамата. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

Д.А. Макарушин, маг.;
рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ РАБОЧИХ МАШИН В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Изменяющаяся структура потребления электрической энергии ставит перед электрическими станциями всех типов сложную задачу функционирования в условиях переменного графика нагрузки.

Естественно, что распределение суммарной нагрузки между станциями разного типа и агрегатами в пределах станции происходит с учетом маневренных возможностей основного энергетического оборудования (паровых котлов, турбин, гидравлических турбин и т.д.).

В последние годы ситуация складывается таким образом, что электростанции, по сути своей предназначенные для работы в базовой части графика нагрузки, все чаще привлекаются для покрытия переменной (полупиковой) части графика.

Это неизбежно вызывает необходимость регулирования производительности рабочих машин в системе собственных нужд.

Эффективность такого регулирования серьезно сказывается на экономических показателях работы электростанции в целом.

Уменьшения расхода электроэнергии можно достигнуть выбором рационального способа регулирования работы вращающихся рабочих машин (тяго-дутьевых, насосов и т.д.) [1]. Применяют следующие способы регулирования: дросселирование (шибер, вентиль, задвижка), направляющие аппараты, изменение частоты вращения электродвигателя.

Самым простым, но и самым неэкономичным, является дроссельное регулирование. Это фактически изменение характеристик сети, на которую работает рабочая машина, при неизменной частоте вращения привода и рабочей машины. При таких условиях регулирования в соответствии с напорно-расходной характеристикой рабочей машины и сети создается

излишний по напор, который и дросселируется. Это приводит к значительным потерям энергии и снижению КПД.

Регулирование производительности рабочих машин изменением частоты вращения привода позволяет при изменении расхода переходить на подобные напорно-расходные характеристики с сохранением КПД агрегата собственных нужд [2]. С этой целью уже давно используются двухскоростные асинхронные двигатели. Данный способ недостаточно экономичен из-за узкого диапазона регулирования. Приходится производить «дорегулирование» другими неэкономичными способами.

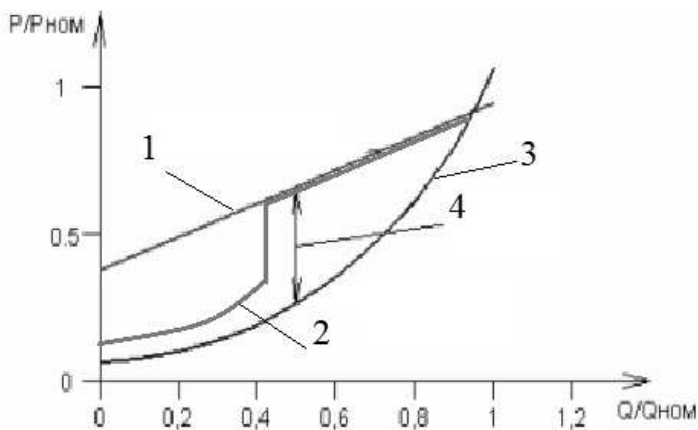


Рис. 1: 1 – дросселирование; 2 – двухскоростной двигатель; 3 – частотное регулирование; 4 – экономия энергии

Регулирование частоты вращения рабочей машины можно производить изменением частоты питающего напряжения электродвигателя. Принцип частотного метода регулирования скорости заключается в том, что, изменяя частоту питающего напряжения, можно при неизменном числе пар полюсов изменять угловую скорость магнитного поля статора.

Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ является наиболее перспективным для регулирования, несмотря на его стоимость. Потери мощности при таком регулировании невелики.

Целью работы является анализ способов регулирования производительности вращающихся рабочих машин, выбор эффективного диапазона регулирования, выбор наиболее приемлемого способа регулирования и практические рекомендации по реализации предложений в эксплуатационной практике.

Библиографический список

1. **Черкасский В.М.** Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. **Костенко М.П.,** Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2 ч. Ч. 2. Машины переменного тока: учеб. для студентов вузов. Изд. 3-е. – Л.: Энергия, 1973.

Е.Г. Сопин, студ.;
рук. В.М. Лапшин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАЦИОНАЛЬНОГО
СТАНДАРТА И СТАНДАРТА МЭК ПО РАСЧЕТУ
ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СИСТЕМЕ
СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

С точки зрения рассматриваемых вопросов интерес представляет деятельность крупнейшей международной организаций по стандартизации: Международной электротехнической комиссии (МЭК).

МЭК занимается стандартизацией в области электротехники, электроники, радиосвязи, приборостроения.

Глобализация мирового рынка, характеризующаяся открытием границ на пути свободного перемещения людей, товаров, капитала и информации, требует перехода стран на единые стандарты.

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

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

1) Принимают стандарт МЭК в качестве национального стандарта с аутентичным переводом текста стандарта на национальный язык.

2) Разрабатывают национальные стандарты по проблемам, отраженным в стандартах МЭК, с учетом сложившихся национальных традиций, новых научных достижений, накопленного национального опыта. Национальный стандарт должен базироваться на тех же физических представлениях и отвечать принципам соответствия стандартам МЭК. Этот подход не исключает существенных различий в методах расчета и проверки электротехнического оборудования, руководящих указаниях по применению.

Ярким примером такого подхода являются российский национальный стандарт: ГОСТ Р 52735-2007 [1] и стандарт МЭК, в котором отражены те же самые вопросы, связанные с расчетом токов короткого замыкания в электрических цепях: СЕI 60909-0: 2001 [2].

В связи с изложенным уместно представить в краткой форме основные отличия и практически полные совпадения в российских национальном стандарте и стандарте МЭК.

В работе определены токи подпитки (периодические токи КЗ) от группы асинхронных двигателей, подключенных к одной секции 6 кВ блока 300 МВт КЭС, к моменту времени $t = 0$ (начальное значение) и $t = 0,1$ с (момент отключения тока КЗ).

Международный стандарт определяет начальное действующее значение периодического тока подпитки от асинхронного двигателя как пусковой ток этого двигателя. Такая практика широко распространена в нашей стране, но отличается от рекомендаций ГОСТ на 5 – 7 % в сторону увеличения расчетных токов.

Методы расчета начального значения аperiodического тока подпитки от АД и ударного тока, рекомендованные стандартом МЭК, аналогичны методам национального стандарта [1].

Однако определение периодических токов подпитки ко времени отключения КЗ значительно отличается по методам расчета в ГОСТ и стандарте МЭК.

В соответствии с ГОСТ действующее значение периодической составляющей тока КЗ от асинхронного двигателя в произвольный момент времени будет равно

$$I_{nI_{d_i}} = \gamma_{I_{d_i}} I_{n0_{d_i}}, \quad (1)$$

где $\gamma_{I_{d_i}}$ определяется по специальным расчетным кривым.

В стандарте МЭК используется расчетное выражение

$$I_{nI_{d_i}} = \mu q I_{n0_{d_i}}, \quad (2)$$

где коэффициенты μ и q для времени отключения $t = 0,1$ с определяются по расчетным выражениям:

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-I_{n0} / I_{ном}}, \quad (3)$$

$$q = 0,57 + 0,12 \ln(P_{ном} / p), \quad (4)$$

где p – число пар полюсов статорной обмотки двигателя.

Сравнительный расчет по группе асинхронных двигателей показал, что суммарные начальные периодические токи подпитки, определенные по методикам ГОСТ и стандарта МЭК, весьма близки по значениям. Это доказывает необходимое соответствие ГОСТ и стандарта МЭК. Заметное отличие в результатах по токам к моменту отключения отмечено только у двигателей большой мощности с одной парой полюсов статорной обмотки. Этот вопрос требует исследования

Библиографический список

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

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

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЕЙ ОБМОТКИ РОТОРА ПО ТОКУ СТАТОРА

Короткозамкнутые асинхронные электродвигатели являются самыми распространенными электрическими машинами в приводах современных технологий, за счет своей простоты конструкции, высокой надежности и небольшой стоимости. Однако ежегодно выходят из строя 20 – 25 % от общего количества всех установленных электродвигателей, что приводит к тяжелым авариям и большому материальному ущербу [2].

Таким образом, задачи снижения уровня прямых и косвенных затрат в процессе эксплуатации АД, повышения качества их диагностики, контроля за их состоянием и повышения надежности в целом актуальны в настоящее время в любой отрасли производства.

Рассмотрены современные методы контроля состояния обмоток роторов асинхронных двигателей. Следует отметить, что наиболее частые повреждения обмоток роторов электродвигателей приходится на обрывы стержней – 80 % отказов и более [1]. Современные методы диагностирования обрывов стержней обмоток роторов среди прочих – это вибрационная диагностика, метод Парка, спектральный анализ тока статора, внешнего и внутреннего магнитного поля. Наиболее перспективным является спектральный анализ тока статора и внешнего магнитного поля, где в качестве диагностического параметра используется значение амплитуд характерных гармоник (фиктивной обмотки ротора – ФОР).

В связи с развитием систем АСУ ТП позволило создать более эффективные методы диагностирования состояния электродвигателей даже в пусковых режимах, где значения пусковых токов и моментов имеют гораздо большие значения по сравнению со стационарными режимами, при этом искомые гармоники, в методе спектрального анализа, более проявлены. Однако, стоит отметить, что для двигателей, использующихся для приводов дробилок, мельниц и прочих механизмов, работающих в нестационарном режиме нагрузки, методы, позволяющие определить состояние стержней обмоток роторов, неприменимы.

В связи с этим, большой интерес представляет создание автоматизированной системы функционального контроля состояния электродвигателей как в нормальных, так и в пусковых режимах.

Целью данной работы является выявление четкого перехода из исправного состояния обмотки ротора в состояние, где присутствуют оборванные стержни обмотки ротора асинхронных электродвигателей по току статора.

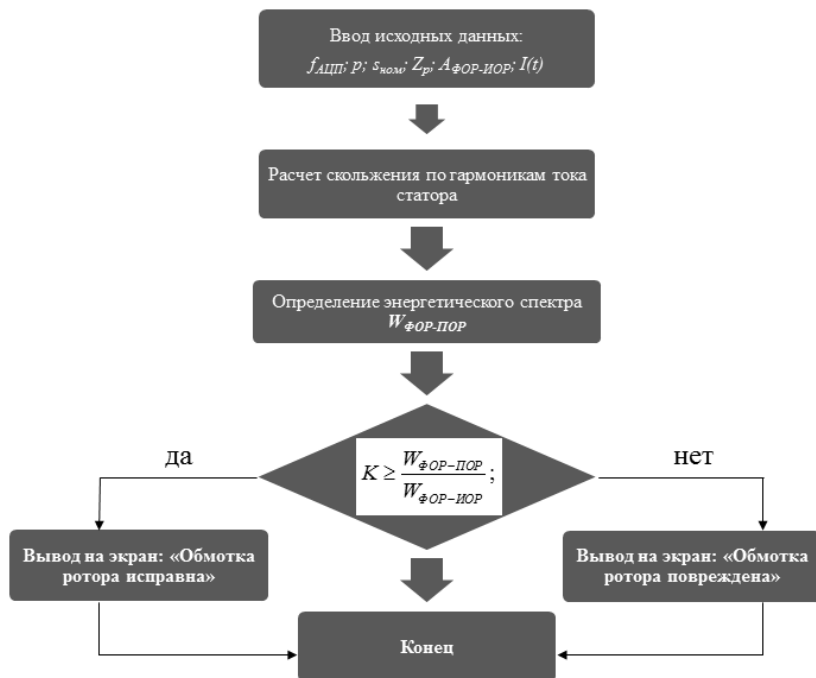


Рис. 1. Алгоритм определения наличия оборванных стержней обмотки ротора по току статора

Таким образом, зная критерий перехода из исправного состояния стержневой обмотки ротора в неисправное, позволит автоматизировать процесс обнаружения дефекта на ранней стадии развития без вывода двигателя в ремонт, что позволит до минимума снизить ущерб от поврежденных асинхронных двигателей.

Библиографический список

1. **Скоробогатов А.А.** Разработка методов контроля состояния короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей собственных нужд электростанций: дисс. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2006. – 155 с.
2. **Комплексный** метод диагностики асинхронных электродвигателей на основе использования искусственных нейронных сетей / Пономарев В.А, Суворов И.Ф. // Новости электротехники. – 2011. – 2 (68).

СЕКЦИЯ 18

ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Председатель – к.т.н., доцент **Словесный С.А.**
Секретарь – старший преподаватель **Шадриков Т.Е.**

К.В. Данилин, маг.;
рук. М.Ш. Гарифуллин, д.т.н., проф.
(КГЭУ, г. Казань)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПОСЛЕ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЖИДКОСТЯХ

В данной работе приведены результаты, полученные в ходе проведенной экспериментальной работы по исследованию и сравнению характеристик бумажной изоляции, подвергавшейся искусственному старению в диэлектриках нескольких видов.

Объектом исследования являлась трансформаторная бумага, погруженная в минеральные масла марки ТКп и ГК и диэлектрические жидкости на основе сложных эфиров MIDEЛ 7131 (синтетический) и MIDEЛ eN (натуральный). Емкости с соответствующими образцами подвергались термодеструкции при температуре 150 °С, длительность которой составила 120 часов. Для приведения промежуточных и итоговых характеристик состаренных образцов оценивалась динамика изменения цветовых координат бумаги и изменения механической прочности.

В результате проведения эксперимента было выявлено, что в масле марки ТКп деградация бумажной изоляции происходит быстрее всего, и после 120 часов термодеструкции она практически полностью разрушилась, бумага стала хрупкой и остаточная механическая прочность стремилась к нулевой отметке.

Бумага, подвергавшаяся воздействиям в масле ГК, показала лучшие характеристики по сравнению с образцами из масла ТКп, однако стойкость масла ГК к старению и окислительным процессам не такая высокая как у жидкостей на основе сложных эфиров. Бумага в жидкости MIDEЛ 7131 показала лучшие характеристики на промежутке от 30 до 90 часов и значительное ухудшение произошло только в конечной стадии эксперимента.

Характеристики образцов бумажной изоляции, подвергавшиеся термомодеструкции в MIDEЛ eN оказались наилучшими, что прослеживается в изменении цвета и значений механической прочности на разрыв.

Библиографический список

1. **Брай И.В.** Регенерация трансформаторных масел. – М.: Химия, 1972. – 168 с.

Ю.С. Чебрякова, асп.;
И.И. Шилов, студ.
(ВлГУ, г. Владимир)

**СПОСОБ ЭЛЕКТРОШУМОВОЙ ДИАГНОСТИКИ
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Электрошумовые методы диагностики высоковольтного оборудования по параметрам частичных разрядов (ЧР) позволяют выявлять дефекты изоляции на ранних стадиях развития. Известны способы диагностики под рабочим напряжением путём измерения характеристик ЧР с помощью индуктивных и емкостных датчиков [1 – 3]. Наиболее совершенным является способ контроля частичных разрядов [3], заключающийся в том, что при рабочем напряжении на высоковольтном вводе электромагнитное поле частичных разрядов силового трансформатора воспринимают индуктивным и емкостным датчиками, выходные сигналы которых фильтруют, усиливают и умножают один на другой и в соответствии со знаком произведения формируют сигнал, несущий информацию о частичных разрядах в баке трансформатора. Однако способ не обеспечивает требуемой селективности разрядов внутри и вне высоковольтного оборудования, имеет недостаточную достоверность и не обладает необходимой наглядностью представления результатов контроля. Указанные недостатки в значительной степени обусловлены широким диапазоном значений частоты следования частичных разрядов в изоляции трансформатора. В результате при определённых значениях напряженности электрического поля частота следования ЧР настолько высока, что из-за инерционности датчиков, фильтрующих, усиливающих и перемножающих компонент средств измерений происходит искажение параметров частичных разрядов, возможно появление ложной полярности произведения сигналов индуктивного и емкостного датчиков. Из-за наложения ЧР, возникающих в различных областях диагностируемого оборудования, друг на друга возможно насыщение усиливающих компонент, что приводит к временному сдвигу перехода их выходного напряжения через нулевой

уровень, и так же может явиться причиной неправильного определения полярности. В результате требуемый уровень селективности к восприятию разрядов внутри и вне диагностируемого высоковольтного оборудования не обеспечивается. Кроме того, при использовании этого способа для регистрации характеристик ЧР с помощью широко применяемых при диагностике высоковольтного оборудования цифровых регистраторов возникает трудно устранимое противоречие между скоростью и точностью регистрации [4]. Указанные недостатки существенно снижают эффективность диагностики высоковольтного оборудования методом частичных разрядов.

Целью работы является повышение достоверности и наглядности результатов диагностики высоковольтного оборудования за счёт обеспечения высокой селективности ЧР внутри и вне оборудования, снижения погрешностей измерения параметров ЧР и представления результатов диагностики в виде зависимостей текущего значения суммарного кажущегося заряда ЧР от напряжения на высоковольтном вводе диагностируемого оборудования. Указанная цель достигается тем, что электромагнитное поле частичных разрядов воспринимают на высоковольтном вводе силового трансформатора индуктивным и емкостным датчиками, выходные сигналы которых фильтруют, усиливают и умножают один на другой и в соответствии со знаком произведения формируют сигналы, один из которых пропорционален текущему значению суммарного кажущегося заряда ЧР, второй – текущему значению частоты ЧР. С помощью первого сигнала определяют зависимость суммарного кажущегося заряда ЧР от напряжения на высоковольтном вводе диагностируемого оборудования, а с помощью второго корректируют скорость изменения напряжённости электрического поля в изоляции, обеспечивая стабилизацию частоты ЧР. Таким образом, при диагностике предлагаемым способом напряжённость электрического поля в изоляции высоковольтного оборудования изменяют в соответствии с текущим значением частоты ЧР, снижая скорость изменения напряжённости при увеличении частоты ЧР и увеличивая при её уменьшении, т.е. проводят диагностику в режиме стабилизации текущего значения частоты ЧР на уровне, соответствующем минимальным погрешностям измерения параметров ЧР, определяя при этом суммарный кажущийся заряд ЧР [5].

Библиографический список

1. **Application** of a capacitive Network Winding Representation to the Location Partial Discharges in Transformers / James R.E. et al. // Electric Engineering Transaction. – 2007. – Vol. EE-13, N2. – P. 95 – 103.
2. **Pattern** Analysis of Partial Discharges / Meijer S., Gulski E., Smit J. // IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation. – 2008. – Vol. 15, No 6. – P. 830 – 842.

3. Пат. 004019 В1 Евразийское патентное ведомство, МКП G 01R 31/02, 31/34. Способ контроля частичных разрядов / Фольк А. Гулски Е.; опубл. 30.12.2007.

4. **Михеев, Г.М.** Цифровая диагностика высоковольтного оборудования / Михеев Г.М. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI». – 2008. – 304 с.

5. Пат. РФ на изобретение № 2536795. Способ диагностики высоковольтного оборудования по параметрам частичных разрядов/ Шахнин В.А., Чбрякова Ю.С., Мироненко Я.В. – Бюлл. изобр. № 12, 2014.

И.С. Факеев, студ.;
рук. Ю.А. Лавров, к.т.н.
(НГТУ, г. Новосибирск)

ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИСКЛЮЧЕНИЮ И ДЕМПФИРОВАНИЮ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАБЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время в отечественном электросетевом комплексе все более широкое применение находят кабели нового поколения – кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (КСПЭ) напряжением 110 – 220 кВ. Кабели с изоляцией из твердого диэлектрика полностью вытеснили маслонаполненные кабели и кабели высокого давления, использующих «мягкий» диэлектрик в виде бумажной изоляции, пропитанной маслом. Данный процесс обусловлен рядом преимуществ КСПЭ высокого напряжения (ВН) по отношению к кабелям традиционного исполнения. К преимуществам можно отнести: повышенную пропускную способность, более дешевую и быструю технологию монтажа, а также возможность прокладки на трассах с неограниченным перепадом высот.

Однако, помимо преимуществ у КСПЭ можно выделить основной недостаток – чувствительность твердой изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ) к воздействию высокочастотных (ВЧ) перенапряжений, обусловленных набеганием на кабельную вставку с воздушной линии (ВЛ) полных и срезаемых волн атмосферного происхождения с крутыми фронтами. При этом следует отметить, что применение в типовых схемах использования защитных аппаратов типа ОПН не спасает СПЭ-изоляцию от воздействия ВЧ перенапряжений, поскольку ОПН ограничивают уровень перенапряжений «сверху» (по амплитуде), но не влияет на демпфирование крутизны импульсных перенапряжений до времени срабатывания ОПН.

Экспериментальные исследования отечественных и зарубежных ученых показали, что воздействие на КСПЭ ВЧ перенапряжений приводит к более ускоренной деградации СПЭ-изоляции за счет более раннего раз-

вития электрических триингов (а также перехода водных триингов в электрические) и их ускоренного развития, что сказывается на сроке службы кабелей [1].

Таким образом, необходимо предложить технические мероприятия по исключению либо демпфированию ВЧ перенапряжений, воздействующих на изоляционную систему кабеля.

Анализ показал, что кабельные вставки между ВЛ и подстанцией (ПС) в виде ОРУ или КРУЭ имеют длины от нескольких сотен метров до единиц километров. В докладе на примере объекта энергомоста напряжением 220 кВ «Тамань – Крым», который проходит через Керченский пролив с использованием подводных кабелей длиной около 14 км, показаны необходимые технические мероприятия по исключению и демпфированию ВЧ перенапряжений.

В качестве таких мер могут быть предложены следующие:

- применение линейных защитных аппаратов (ЛЗА), устанавливаемых на опорах ВЛ на трех-четыре ближайших пролетах по обеим сторонам от кабельной вставки – эта мера предназначена для исключения набегания на кабельную вставку с ВЛ срезанных волн и волн обратных перекрытий при ударах молнии в провод или опору (грозозащитный трос);

- установка в расщелку провода между ВЛ и КСПЭ в месте их сопряжения частотно зависимого устройства (ЧЗУ) или силового реактора (СР), применяемого в каналах высокочастотной связи ВЛ – эта мера предназначена для демпфирования ВЧ перенапряжений.

Следует отметить, что на стадии проектирования была предусмотрена защита кабельных линий (КЛ) от грозовых перенапряжений путем установки по концам КЛ на переходных пунктах ОПН. Однако в связи с большими длинами кабельных вставок (до 14 км) уровень воздействующих грозовых перенапряжений невысокий за счет значительной емкости кабеля и, как следствие, отсутствия подзаряда емкости КЛ, поэтому в этом случае нет необходимости в установке ОПН по концам КЛ. Технически целесообразно было бы установить ЛЗА на опорах ВЛ вблизи кабельных вставок или установить в расщелку провода в месте сопряжения ВЛ и КЛ реактивные (индуктивные) элементы в виде ЧЗУ или СР. Эти меры действительно позволят повысить надежность эксплуатации и срок службы кабелей при воздействии на них грозовых перенапряжений.

Библиографический список

1. **Кадомская К.П.** Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с.

А.М. Ба Бораик, асп.;
рук. А.Е. Усачев, д.ф.-м.н., проф.
(ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань)

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ В ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В ОНЛАЙН И ОФЛАЙН РЕЖИМАХ

Пробой изоляции обмотки статора один из наиболее частых дефектов, возникающих в турбогенераторах (ТГ). Регламентные испытания: повышенным напряжением не всегда способны выявить развивающиеся дефекты. Контролю состояния изоляции ТГ во всем мире уделяется большое внимание, разрабатываются новые и совершенствуются старые методы контроля. Наиболее перспективным методом оценки состояния обмотки статора является метод измерения частичных разрядов (ЧР). Это позволяет своевременно провести их устранение при проведении профилактических и ремонтно-восстановительных работ [1, 2].

Главными факторами, влияющими на характеристики ЧР, являются следующие: нагрузка ТГ, состояние системы охлаждения и окружающей среды (влажность, загрязнение), индивидуальные особенности конструкции и дизайна генератора [2 – 4].

В работе сообщается о результатах исследования особенностей наблюдения частичных разрядов (ЧР) в статоре турбогенератора (ТГ) ТВФ-60-2 при его работе в сети. Показывается, что для правильной интерпретации результатов измерения ЧР в ТГ необходимо знать схему соединения стержней различных ветвей фазных обмоток и порядок их расположения в пазах статора; схемы их пересечения в лобовых частях и распределение напряжения по стержням в пазовой и лобовой части ТГ. Вследствие того, что последовательно соединённые стержни статорной обмотки имеют различный потенциал относительно земли, условия возникновения ЧР в каждом стержне в пазовой и в лобовой части, существенно различаются, а фаза возникновения ЧР становится неоднозначным параметром.

Библиографический список

1. **Hutter W.** Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1992. – V. 8. – No. 3. – Pp. 21 – 32.
2. **ГОСТ ИЕС/TS 60034-27.** Машины электрические вращающиеся. Ч. 27. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки включенных в сеть вращающихся электрических машин. – М.: Изд-во Стандарты, 2015. – 55 с.
3. **Noof M., Lanz S.** PD Diagnostics on Rotating Machines Possibilities and Limitations // Electrical Insulation Conference. – 1999. – Cincinnati, USA. – Pp. 195 – 200.
4. **Русов В.А.** Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования / В.А. Русов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2011. – 367 с.

А.М. Ба Бораик, асп.;
рук. А.Е. Усачев, д.ф.-м.н., проф.
(ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань)

ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ И АМПЛИТУДЫ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Показателем совершенства современных систем регистрации частичных разрядов (ЧР) при контроле дефектов в изоляции электрооборудования на ранней стадии является достоверность полученных результатов. Существенную роль в этом процессе играет выбор схемы регистрации ЧР [1].

В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о степени корреляции между измеряемым броском напряжения при ЧР и характеристиками дефекта изоляции. При регистрации ЧР в виде затухающего колебательного процесса авторы работ [2, 3] часто не оговаривают, как определяется величина кажущегося заряда, и какие характеристики процесса связаны с дефектом, а какие являются свойствами измерительной цепи.

В докладе сообщается о результатах компьютерного моделирования в среде Multisim дефектов с частичными разрядами (ЧР). Имитация процесса частичного разряда осуществлялась замыканием и размыканием ключа, включаемого параллельно ёмкости и сопротивлению дефекта.

Показывается, что амплитуда и форма сигнала ЧР в значительной степени зависит от развязки источника напряжения и участка изоляции с ЧР. Такая развязка при моделировании осуществлялась введением в схему индуктивности и активного сопротивления. Утверждается, что регистрируемая полярность ЧР зависит от градиента напряжения в момент ЧР, который часто имеет случайный характер возникновения, что приводит к кажущемуся противоречию с теорией ЧР в многослойной изоляции. Делается заключение, что колебательный характер переходных процессов при ЧР зависит в основном от параметров подводящих цепей и слабо связан с самим ЧР.

Библиографический список

1. **Вдовико В.П.** Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
2. **An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation / Nenad Kartalovi'c, Dragan Kova'cevi'c, Srdan Milosavljevic // Facta universitatis ser.: Elec. energ. – 2011. – Vol. 24, no. 1. – Pp. 41 – 55.**
3. **Ермаков Е.Г.,** Монастырский А.Е. О проблемах применения электрического метода регистрации частичных разрядов для диагностики высоковольтных силовых трансформаторов // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы. – Екатеринбург: Автограф, 2010. – С. 39 – 48.

*Н.О. Маркова;
рук. Н.Ф. Петрова, к.т.н., доц.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ОТКЛЮЧАЕМОМ ТОКЕ

Как известно, в последнее время элегазовые выключатели получили широкое распространение, и в настоящее время широко практикуется замена воздушных и масляных выключателей на выключатели нового поколения. Однако, после ряда замен были зафиксированы аварии с участием элегазовых выключателей, установленных на линиях с шунтирующими реакторами, вследствие длительного неотключения медленно затухающей аperiodической составляющей. Выключатель не может погасить слабую дугу, так как давление, создаваемое внутри камеры, недостаточно для гашения [1]. Таким образом, вопрос замены старых выключателей на выключатели нового типа является актуальным на сегодняшний день.

Неблагоприятные условия для коммутации будут наблюдаться при резком изменении состояния системы – циклы включения и дальнейшего отключения через малый промежуток времени. Примерами могут быть включения на не устранившееся КЗ, ложная работа автоматики, первичное включение линии [2].

Для оценки безаварийной работы коммутационных аппаратов на основе компьютерной модели было рассмотрено влияние на величину аperiodической составляющей в отключаемом токе и время ее затухания таких факторов, как длина линии, угол включения, мощность системы и мощность реактора (табл. 1).

Таблица 1. Время прохождения полного тока через нулевое значение

Параметр	Диапазон изменения параметра	
	max	min
Длина линии (250...300) км	0,08	0,17
Мощность (индуктивность) системы (0,06...0,2) Гн	0,17	0,08
Мощность реактора (180...360) МВАр	0,14	0,17
Угол включения (0...90)°	0,07	0,16

Увеличение таких параметров, как длина линии и мощность реактора, способствует более быстрому затуханию аperiodической компоненты. Наибольшее значение аperiodической компоненты будет наблюдаться при включении вблизи нулевого значения источника.

При определении влияния различных факторов был использован метод многофакторного планирования эксперимента. В качестве случайных факторов выступают коэффициент компенсации реактивной мощности

($K = 0,5 \dots 1,5$), длина линии ($L = 300 \dots 700$ км) и угол включения ($\varphi = 0 \dots 90^\circ$). При этом было принято их распределение по закону равномерной плотности в приведенном диапазоне. Функцией отклика является время наличия апериодической компоненты.

В качестве плана эксперимента был принят центральный композиционный ортогональный план третьего порядка, для реализации которого необходимо провести 15 вычислительных экспериментов. Вычисления проводились для обычной конструкции выключателя и для выключателя с предвключаемым резистором, поскольку конструкция выключателя с резистором является мерой подавления медленно затухающей апериодической составляющей.

В результате были получены следующие функциональные зависимости:

- для обычной конструкции выключателя

$$T = 0.74 + 0.16K + 5.11 \cdot 10^{-4}L + 0.15\varphi - 0.28K^2 - 1.74 \cdot 10^{-6}L^2 + 7.11 \cdot 10^{-4}KL + 1.01 \cdot 10^{-5}\varphi L;$$

- для выключателя с предвключаемым резистором

$$T = 0.33 - 1.49K - 1.91 \cdot 10^{-4}L - 0.002\varphi - 0.55K^2 - 1.25 \cdot 10^{-6}L^2 + 7.81 \cdot 10^{-4}KL + 1.01 \cdot 10^{-5}\varphi L.$$

Полученные полиномы с высоким уровнем значимости адекватны истинной функции связи и позволяют с высокой точностью оценивать функцию отклика без применений сложных математических моделей в широком диапазоне изменения случайных факторов, что несомненно представляет практическую ценность, и в дальнейшем может использоваться при выборе и проверке выключателей.

Библиографический список

1. Наумкин И.Е. Аварийные отказы элегазовых выключателей при коммутациях компенсированных ВЛ 500 – 1150 кВ // Электричество. – 2012. – № 10.
2. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели / Евдокунин Г., Дмитриев М., Гольдштейн С., Иваницкий Ю. // Новости Электротехники. – 2008. – № 3 (51).

В.А. Пичугин, студ.;
рук. Ю.А. Лавров, к.т.н.
(НГТУ, г. Новосибирск)

РАЗРАБОТКА АППАРАТНЫХ МЕР ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВЫСОКОЧАСТНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИИ ПОДСТАНЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В процессе эксплуатации силовые трансформаторы (СТ) напряжением 110 и 220 кВ подвергаются воздействию грозových перенапряжений с раз-

личными амплитудно-временными параметрами [1]. Силовые трансформаторы наряду с главной изоляцией (между обмоткой высокого напряжения и заземленным баком) имеют продольную (межвитковую) изоляцию, которая с течением времени за счет кумулятивного эффекта при многократном воздействии высокочастотных (ВЧ) перенапряжений снижает электрическую прочность.

Практика показала, что установка защитных аппаратов типа ОПН на подстанции (ПС) не является полной гарантией защиты СТ от грозовых перенапряжений. В грозовой сезон все равно наблюдались случаи выхода из строя СТ. Анализ таких аварийных событий показал, что СТ выходят из строя за счет импульсных пробоев межвитковой изоляции на обмотке высокого напряжения или на обмотках среднего и низкого напряжения при переходе на них импульсов напряжения за счет межобмоточных ёмкостных связей. Это свидетельствует о том, что ОПН не могут демпфировать крутизну фронта воздействующих импульсных перенапряжений (градиентных перенапряжений), они ограничивают перенапряжений лишь «сверху» – по амплитуде. Таким образом, для снижения градиентных перенапряжений необходимо предусмотреть специальные аппаратные меры по демпфированию ВЧ перенапряжений.

В качестве таких аппаратов могут быть предложены следующие:

- частотно зависимое устройство (ЧЗУ), разработанное в НГТУ;
- силовые реакторы (СР), конденсаторы связи (КС) или их совместная комбинация.

ЧЗУ и СР устанавливаются на входном портале ПС и подключаются в рассечку провода между ВЛ и ПС, а КС подключается к шинам ПС относительно земли.

Для выявления эффективности различных аппаратов по подавлению ВЧ перенапряжений на примере проходной ПС 110/35/6, имеющей схему «мостик», были проведены с помощью специально разработанной математической модели, реализованной в прикладном пакете Matlab Simulink, соответствующие численные исследования. При варьировании параметров защитных аппаратов (активное сопротивление, индуктивность, емкость) оценивалось их влияние на снижение крутизны фронта импульса напряжения, набегающего с воздушной линии на ПС.

Проведенные численные исследования по демпфированию ВЧ перенапряжений показали:

- наиболее эффективной аппаратной мерой является применение ЧЗУ, которое на высокой частоте резко увеличивает активное сопротивление и внутреннюю индуктивность (суммарная индуктивность ЧЗУ определяется внутренней индуктивностью проводника с нанесенным на него слоем из ферромагнитного материала с большим μ_r и внешней индуктивностью катушки);

- в качестве альтернативного варианта могут быть применены два-три модуля СР по 1,0 мГн или три модуля КС емкостью по 6,5 нФ, а также их совместная комбинация – один (два) модуля СР и два (один) модуль КС.

Отметим, что, во-первых, применение той или иной аппаратной меры определяется на основе технико-экономического сравнения вариантов, во-вторых, применение СР или КС может оказаться предпочтительнее (по отношению к ЧЗУ), поскольку они имеют промышленный выпуск, а ЧЗУ находятся на стадии опытно-промышленной эксплуатации.

Необходимые значения индуктивности ЧЗУ и СР зависят от типа ПС – её разветвленности (количества примыкающих к шинам ВЛ, суммарной ёмкости подстанционного оборудования) и допустимой для межвитковой изоляции крутизны импульсных перенапряжений. В этой связи для уменьшения объема численных исследований анализ эффективности ЧЗУ и СР проводился с применением метода многофакторного планирования эксперимента, на основании которого был получен регрессионный полином, связывающий оптимальные параметры ЧЗУ и СР (индуктивность) с типом подстанции (её разветвленности) и допускаемым уровнем градиентных перенапряжений на витковой изоляции СТ.

Библиографический список:

1. **Кадомская К.П.** Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с.

Я.К. Старостина, асп.;
рук. С.Н. Сидоров, к.т.н., доц.
(УлГТУ, г.Ульяновск)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЕ ЦЕПИ ЗАЩИТЫ ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Известно, что прямой пуск асинхронного двигателя мгновенным подключением к питающей сети сопровождается броском тока статорных обмоток, многократно превышающим номинальный уровень. Эта особенность создает трудности эксплуатации двигателей средней и большой мощности, так как приводит к просадкам сетевого напряжения, нарушающим нормальный режим электропитания других потребителей электроэнергии. Ограничение пускового тока можно добиться плавным повышением частоты или амплитуды напряжения статорных обмоток. Наиболее простое решение состоит в повышении напряжения с помощью тири-

сторного регулятора переменного напряжения (ТРН), выполняемого на встречно-параллельных тиристорах [2]. Однако применение ТРН ухудшает форму тока, делая его прерывистым. Устранить данный недостаток удастся в схемах пускорегулирующих устройств (ПРУ) с вольтодобавочным трансформатором, снабженным ключевым регулятором напряжения, работающим в режиме высокочастотной широтно-импульсной модуляции.

Повышение энергетических показателей ПРУ достигается введением цепи защиты от коммутационных перенапряжений, появляющихся в моменты запираания силового транзистора. Основной вклад в создание коммутационных перенапряжений вносит ЭДС индукции, наводимая в индуктивных элементах регулятора и самой сети в моменты резкого прерывания тока нагрузки силовым транзистором. Традиционной мерой защиты транзисторных ключей от перенапряжений служит параллельно подключенная RC-цепь (снаббер), однако, ввиду значительности энергии коммутации в схеме ПРУ ведет к недопустимо большим потерям электроэнергии и заметному понижению коэффициента полезного действия всего электропривода. Предлагаемое техническое решение направлено на ограничение коммутационных перенапряжений без появления дополнительных коммутационных потерь электроэнергии и сопутствующего уменьшения коэффициента полезного действия. Для этого в состав ПРУ предлагается ввести цепь защиты от коммутационных перенапряжений в виде полярного конденсатора фильтра, коммутирующего транзистора и двух разделительных диодов с объединенными катодами. Кроме этого в состав устройства управления необходимо ввести блок задержки управляющих импульсов для коммутирующего транзистора.

Принципиальная схема цепи защиты ПРУ от коммутационных перенапряжений приведена на рис. 1. На рис. 2 приведены полученные в процессе компьютерного моделирования диаграммы $U_{C\phi}(t)$ и тока $i_{C\phi}(t)$ полярного конденсатора фильтра в составе цепи защиты от коммутационных перенапряжений традиционного (рис. 2, а) и предлагаемого (рис. 2, б) исполнений, данные результаты показывают эффективность предлагаемой защитной цепи на основе полярного конденсатора фильтра.

Подтверждается, что перевод полярного конденсатора фильтра в режим периодического «частичного разряда-заряда» обеспечивает устойчивое поддержание коммутационных перенапряжений на заданном уровне без необходимости рассеивания энергии в разрядном резисторе. Важно отметить, что достигнутое повышение энергетических показателей сочетается с повышением перегрузочной способности и надежности работы силового транзисторного ключа в динамических режимах работы электропривода [1].

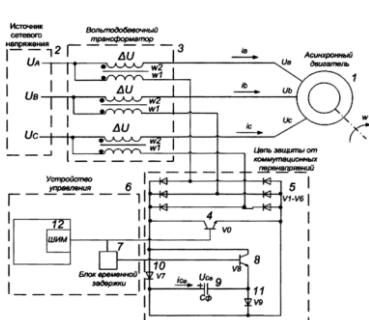
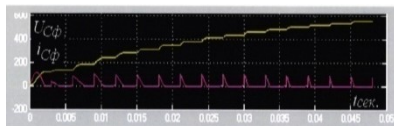
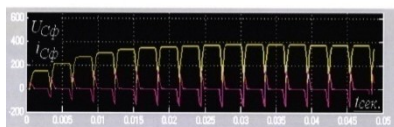


Рис. 1. Принципиальная схема цепи защиты ПРУ от коммутационных перенапряжений



а)



б)

Рис. 2. Диаграммы $U_{C\Phi}(t)$ и тока $i_{C\Phi}(t)$ полярного конденсатора фильтра в составе цепи защиты от коммутационных перенапряжений традиционного (а) и предлагаемого (б) исполнений

Библиографический список

1. Пат. на изобретение № 2596218, РФ, Пускорегулирующее устройство для асинхронного двигателя / Сидоров С.Н., Старостина Я.К.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет» (РУ). – Опубл. 10.09.2016.
2. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 285 с.

*А.Р. Торпищев, студ.;
рук. Ю.А. Лавров, к.т.н.
(НГТУ, г. Новосибирск)*

ОГРАНИЧЕНИЕ ГРОВОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИЮ ГАЗОИЗОЛИРОВАННЫХ ЛИНИЙ

В 70 – 80-е годы прошлого столетия в зарубежном электросетевом комплексе было реализовано несколько пилотных проектов с применением закрытых линий электропередачи (ЗЛЭП) принципиально новых конструкций – газоизолированных линий (ГИЛ) высокого напряжения (ВН) одножильного и трехжильного исполнения. В отличие от маслонаполненных кабелей (МНК) и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (КСПЭ) ГИЛ имеют повышенную (в 7 – 10 раз) пропускную способность. Однако в силу относительно высокой себестоимости ГИЛ на нашли широкого применения. Вместе с тем в настоящее время отмечается возрос-

ший интерес к ГИЛ как за рубежом, так и у нас в стране за счет снижения стоимости ГИЛ второго поколения при использовании более современных технологий их изготовления.

В ГИЛ изоляционная система включает в себя газ (смесь элегаза 70 % и азота 30 %), изоляционные распорки из композитных полимерных материалов и поверхность раздела распорки-газ. Конструктивно ГИЛ на различные классы напряжения выполняются в одножильном исполнении (ОИ) или трехжильном исполнении (ТИ).

На рис. 1 приведены ГИЛ различного конструктивного исполнения, для которых были определены в соответствии с методикой [1] волновые параметры, необходимые для исследования грозовых перенапряжений, воздействующих на ГИЛ ОИ и ТИ.

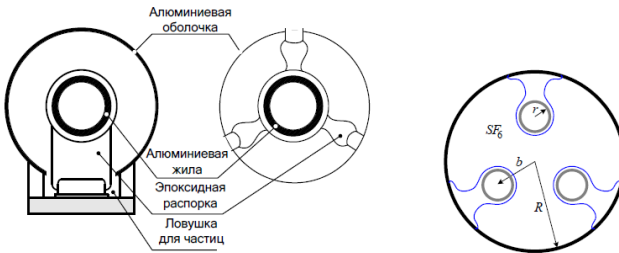


Рис. 1. ГИЛ однофазного и трехфазного исполнения

Анализ эксплуатируемых за рубежом ГИЛ напряжением показал, что можно выделить следующие расчетные схемы, в соответствии с областями их применения:

- схема «ВЛ-ГИЛ-ВЛ» при использовании ГИЛ в качестве вставки длиной 300...500 м в воздушную линию (ВЛ) при пересечении нескольких ВЛ;

- схема «ВЛ-ГИЛ-КРУЭ» для осуществления сопряжения ВЛ и КРУЭ при длинах ГИЛ от нескольких сотен метров до единиц километров.

Очевидно, что внедрение ГИЛ второго поколения должно основываться на системном подходе, учитывающем такие факторы как: экономичность, экологичность и надежность эксплуатации.

Расчеты показали, что диапазоны изменения волновых параметров для ГИЛ ОИ и ТИ напряжением 110, 220 и 500 кВ на грозовой частоте составили:

- волновое сопротивление – 75 – 85 и 55 – 75 Ом, соответственно для ГИЛ трехфазного и однофазного исполнения;

- коэффициент затухания – $2,0 \cdot 10^{-5}$ – $6,5 \cdot 10^{-5}$ 1/км;

- скорость распространения электромагнитной волны – 300 м/мкс.

Применение современных защитных аппаратов типа нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) позволяет более глубоко ограничивать грозовые перенапряжения и, как следствие, уменьшать габаритные размеры ГИЛ, что повышает экономичность газоизолированных линий. Однако вместе с ограничением уровня грозовых перенапряжений необходимо уделять внимание и подавлению высокочастотных (ВЧ) перенапряжений, возникающих при набегании с ВЛ на ГИЛ импульсных волн с крутыми фронтами, так называемых срезанных волн и волн обратных перекрытий. В качестве аппаратных мер по ограничению ВЧ перенапряжений были рассмотрены частотно зависимые устройства (разработанные в НГТУ), а также промышленно выпускаемые силовые реакторы (используемые в каналах высокочастотной связи на ВЛ). За счет реактивного сопротивления (обусловленного индуктивностью 2,5 – 3,0 мГн) удастся значительно демпфировать ВЧ перенапряжения, воздействующие на ГИЛ.

Библиографический список

1. **Кадомская К.П.** Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с.

И.Н. Белов, студ.;
рук. Ю.П. Максимов, к.т.н., доц.
(ВлГУ, г. Владимир)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ПОДСТАНЦИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

В качестве объекта исследования была принята подстанция понижающего типа, к которой подходят две воздушные линии 110 кВ. Для автоматизированного расчета молниезащиты подстанции в работе используется программное обеспечение в среде MATLAB, с помощью которого выполняется выбор вариантов для решения поставленной задачи.

Для определения габаритных размеров подстанции необходимо знать все габаритные размеры элементов подстанции. Габарит проезда вдоль выключателей для передвижных монтажно-ремонтных механизмов и приспособлений, а также передвижных лабораторий, габариты основных элементов подстанции(трансформаторов и выключателей), наименьшее расстояние от токоведущих частей до различных элементов ОРУ (подстанций) в свету для напряжения 110 кВ, расстояния: между проводами разных фаз; между токоведущими частями разных цепей в разных плоскостях, а также между токоведущими частями разных цепей по горизон-

тали при обслуживании одной цепи и неотключенной другой, от токоведущих частей до верхней кромки внешнего забора, между токоведущими частями и зданиями или сооружениями; от токоведущих частей или от элементов оборудования и изоляции, находящихся под напряжением, до постоянных внутренних ограждений высотой 1,6 м, до габаритов транспортируемого оборудования; от неогражденных токоведущих частей до земли или до кровли зданий при наибольшем провисании проводов – все эти факторы были учтены при суммировании расстояния между оборудованием, а также габаритами самого оборудования для получения точных габаритов подстанции.

В качестве следующего шага выполняется расчет молниеотводов и определение зоны защиты. Защита представлена двумя вариантами: одиночным и несколькими с совместной зоной защиты молниеотводами. Для определения границ зоны защиты используются формулы, уточненные по результатам опыта эксплуатации.

Для выполнения молниезащиты при помощи одного молниеотвода находятся вершина конуса защиты и радиус основания конуса защиты на уровне земли. Далее рассчитываются радиусы конуса защиты с целью определения степени защищенности высокого оборудования. В итоге оказалось, что, расположив одиночный молниеотвод высотой 25 метров в середине подстанции, можно обеспечить защиту всего оборудования, находящегося на подстанции.

Для выполнения защиты при помощи нескольких молниеотводов число последних было выбрано в количестве трех. Близко расположенные молниеотводы способствуют взаимному усилению защитного действия и образуют многократный молниеотвод. Его зона защиты определяется парными зонами защиты его ближайших молниеотводов. При этом считается что внутренние зоны защищены также надежно, как и зона одиночного молниеотвода. Очертания стержневой части зоны защиты выполняются по расчетным формулам, используемым для построения зоны защиты одиночного молниеотводов. Совместная зона ограничивается ломаной кривой, которую можно построить по трем точкам.

В результате, вариант установки трех молниеотводов оказался предпочтительней с точки зрения надежности защиты подстанции от прямых ударов молнии, но экономически этот вариант менее выгоден.

Библиографический список

1. **Неклепаев Б.Н.**, Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы. – БХВ-Петербург, 2013.
2. **Хилилов Ф.Х.** Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.
3. **Илларионов.** Техника высоких напряжений. – Энергоиздат, 1982.

*A. Tankoy, étudiant;
maître de conférences T. Shadrikov,
Professeur A. Sokolov
(ISPEU, d'Ivanovo)*

LA RECHERCHE D'UNE FORME DE TENSION À LA SORTIE D'UN CONVERTISSEUR À SEMI-CONDUCTEUR DANS UN RÉSEAU LOCAL HAUTE TENSION DE HAUTE FRÉQUENCE

Compte tenu du développement très rapide du secteur électronique de puissance, il est vraiment possible de créer des puissants convertisseurs des tensions à semi-conducteur. L'un des domaines le plus prometteurs à la conception du développement de l'énergie future est la création ou l'utilisation des systèmes électriques, flexible du courant alternatif en courant continue (FADCES) [1, 2].

Pour ce types des systèmes on adapte des convertisseurs de puissance a semi-conducteur ensemble avec des puissants transformateurs à hautes fréquences. Cela permettra d'améliorer le rendement (η) de l'énergie électrique en réduisant des pertes électriques lors du transport et la distribution et de réduire considérablement les prix d'achat du kilowatt d'électricité [3, 4].

L'alimentation du transport électrique est réalisée à partir de ligne de contact de tension alternatif qui est obtenu par un redressement de la tension d'alimentation 220/380V 50 Hz, sans appliquer un transformateur du réseau. La tension continue est servie vers la sortie d'un convertisseur de tension, rassemblé par le schéma du pont de graetz qui convertit une tension continue en alternatif à haute fréquence (10÷20 kHz), oscillogramme qui est présenter sur la (fug. 1) se rapproche de la forme rectangulaire, (fug. 1, a), forme trapézoïdale (fug. 1, b), ou en forme trapèze avec pause (fug. 1, c – est le plus proche de la version réel).

Pour analyser le processus de transport électrique à augmenter la fréquence, il est nécessaire d'appliquer la méthode d'analyse fréquentiel [5], lorsque la courbe varie, il affecte la tension du convertisseur qui représente la somme des harmonies, on peut utiliser la formule mathématique de décomposition en série de fourrier. La résolution de la recherche montre que la variante la plus pratique présente la tension du convertisseur, est à la forme de la tension rectangulaire (fug. 1, a), bien que dans la pratique, il est inaccessible en raison de la commutation du processus d'inversion des transistors. La meilleure convergence des résultats de calcul et l'expérience sont représentées par la variante fug. 1, c. L'analyse du spectre de la décomposition de chaque variante (fug. 1), a également obtenu la dépendance précise du calcul pris en compte en harmonie de décomposition en série de fourrier.

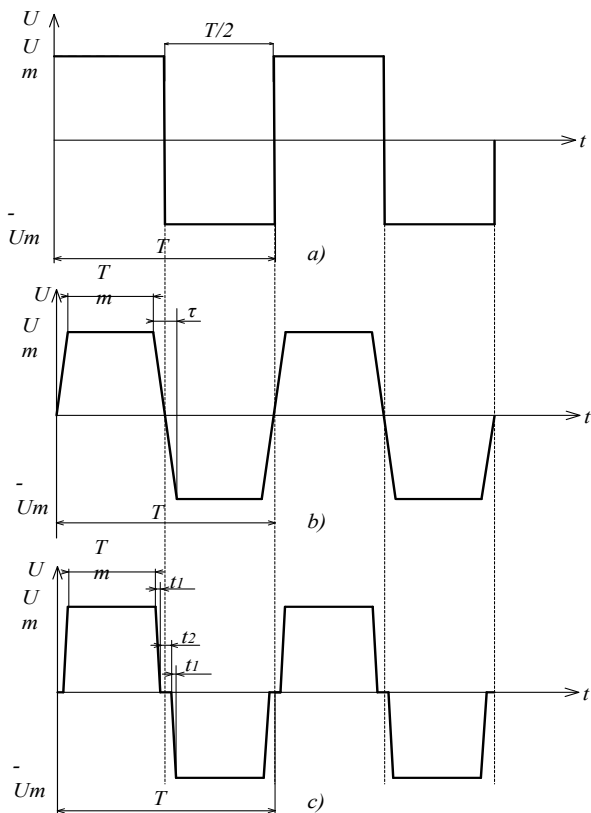


Figure 1. Style d'oscillogramme et le paramètre dans l'entrée des transistors du convertisseur de tension $U(t)$

Documentations

1) **Principes** de l'organisation moderne de l'électricité / Fedosov S.V., Gousenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov YU.N., Sokolov A.M. // *Energie*. – 2014. – № 3. – Page 46 – 49.

2) **Principes** de l'organisation moderne de l'électricité / Fedosov S.V., Gousenkov A.V., Lebedev V.D., Bocharov YU.N., Sokolov A.M. // *Energie*. – 2014. – № 4. – Page 15 – 18.

3) **La technique** économique pour le puissant transformateur à haute tension des réseaux électrique local de la tension alternatif à haute fréquence / Gousenkov A.V., Lebedev V.D., Shadrikov T.E., Sokolov A.M. // *Energie*. – 2015. – № 2. – Page 11 – 14.

4) **Concernant** la possibilité et la fiabilité physique de transport électrique pour la tradition inhabituel du paramètres utilisés des courants et des tensions / T.E. Shadrikov, A.M. Sokolov, A.V. Gousenkov, V.D. Lebedev. // *Energie*. – 2015. – № 4. – Page 29 – 32.

5) **Caractéristiques** d'application, la fréquence d'analyse lors du calcul des circuits électriques avec des convertisseurs transistorisé de tension / Gousenkov A.V., Lebedev V.D., Sokolov A.M., Shadrikov T.E., Strahov A.S. // *Electricité*. – 2016. – № 1. – Page 4 – 12.

В.С. Максимов, студ.;
рук. О.С. Мельникова, к.т.н.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ИЗМЕНЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАСЛОПРОБОЙНИКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НОМЕРА ПРОБОЯ

В процессе эксплуатации высоковольтного маслонаполненного оборудования важно регулярно контролировать электрическую прочность трансформаторного масла. И в случае необходимости принимать технические меры по восстановлению электроизоляционных характеристик эксплуатационных масел.

В исследованиях в качестве диагностических характеристик электрической прочности масла использовались статистические характеристики пробивных напряжений, которые определялись по результатам испытаний масла в стандартном маслопробойнике АИМ-90А, в соответствии с методикой ГОСТ 6581-75 и МЭК [1, 2].

Для заданного образца масла определялись статистические характеристики пробивных напряжений в зависимости от номера пробоя в маслопробойнике в одной и той же порции масла. Всего было проведено пятнадцать серий пробоев заданной пробы масла. При длительном перерыве в исследованиях перед началом очередных испытаний масло перемешивалось магнитной мешалкой в течение пяти минут.

В ходе анализа результатов были получены зависимости:

- среднего пробивного напряжения от номера серии испытания $\langle U_{пр} \rangle = f(N_c)$ (рис. 1);

- наименьшего и наибольшего значения пробивного напряжения от номера серии $U_{min}, U_{max} = f(N_c)$ (рис. 2);

- вероятность появления минимальных и максимальных значений пробивного напряжения от номера эксперимента в сериях испытаний (рис. 3).

Как видно из гистограммы (рис. 1), наблюдается рост среднего пробивного напряжения при увеличении количества проводимых серий испытаний. Также отмечается, что с ростом числа проведенных серий испытаний увеличивается максимальное и минимальное пробивное напряжение испытываемой порции масла, это говорит о том, что свойства масла изменялись в ходе проведения испытаний. Вероятность получения минимального напряжения пробоя наблюдается во 2 и 3 опытах в каждой из 15 серий испытаний, тогда как максимальное напряжение, чаще всего наблюдается в 3 и 5 опытах (рис. 3).

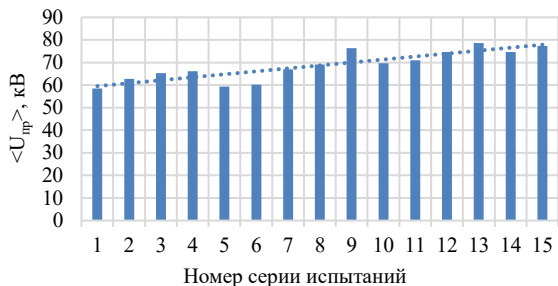


Рис. 1. Зависимость среднего пробивного напряжения от номера серии испытаний

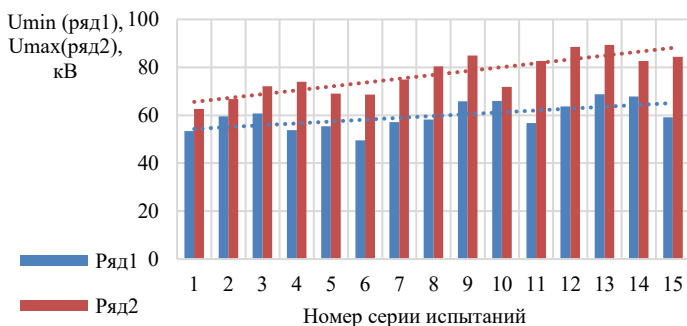


Рис. 2. Зависимость минимального и максимального пробивного напряжения от номера серии испытаний

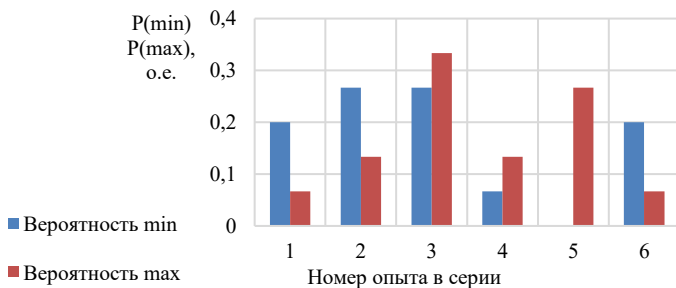


Рис. 3. Вероятность появления минимальных и максимальных значений пробивного напряжения от номера эксперимента в сериях испытаний

Библиографический список

- ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкости. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2008.
- IEC 60156 1995.

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Частичные разряды (ЧР) в высоковольтной изоляции сопровождаются кратковременным снижением испытательного напряжения на электродах исследуемого объекта, инициирующим переходный процесс в измерительном контуре.

Особенностью регистрации высокочастотных процессов цифровым осциллографом является прерывистость «развертки луча осциллографа». При этом часть информации теряется в промежутках между двумя измерениями. Уменьшение погрешности при регистрации высокочастотных процессов цифровым осциллографом возможно воздействием на параметры измерительного контура для уменьшения собственной частоты колебаний. С целью оптимизации электрических параметров контура можно изменять его индуктивность и (или) ёмкость соединительного конденсатора.

Измерения ЧР проводятся в высоковольтных конструкциях обладающих разной ёмкостью. Наличие соединительного конденсатора одной фиксированной ёмкости не сможет обеспечить необходимый уровень настройки измерительного контура для разных исследуемых объектов.

Точность и чувствительность регистрации токов переходного процесса, сопровождающего ЧР в изоляции, может быть повышена в условиях возможного плавного изменения ёмкости соединительного конденсатора.

В качестве простейшего варианта такого конденсатора может рассматриваться электродная система с изменяющимся расстоянием между электродами, размещаемая на открытом воздухе. Для удобства использования такой конденсатор переменной ёмкости может быть размещен внутри изоляционной конструкции

Основными требованиями, предъявляемыми к высоковольтным элементам схемы регистрации ЧР являются высокая электрическая прочность и отсутствие в них частичных разрядов.

Для оценки возможности изготовления воздушного соединительного конденсатора переменной ёмкости и определения его параметров выполнен расчет и анализ распределения электрического поля между электродами, размещенными внутри диэлектрического цилиндра.

Верхний (высокопотенциальный) электрод неподвижен, положение нижнего (низкопотенциального) электрода в процессе настройки схемы может меняться с помощью электропривода.

Расчет выполнен с помощью универсальной программной платформы для компьютерного моделирования физических задач COMSOL Multiphysics. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 1.

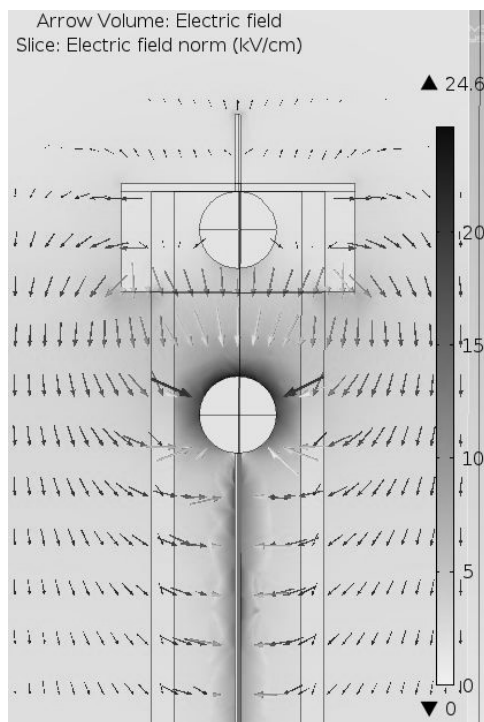


Рис. 1. Результат компьютерного моделирования электродной системы в программном комплексе COMSOL Multiphysics

Рассмотрены физические процессы в межэлектродной области, представляющей наибольший интерес при определении возможных критических воздействий электрического поля. Результатом компьютерного моделирования является картина распределения напряженности электрического поля в исследуемой модели. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что максимальная напряженность электрического поля вблизи электродов не превышает допустимую.

А.Ю. Соболев, маг.;
рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доц.,
Ю.А. Митькин, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МАСЛА ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ 500 КВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В процессе эксплуатации трансформаторного оборудования изменение диагностических параметров часто оценивается по отношению текущего и предшествующего значений измеряемого параметра, что открывает дополнительные возможности повышения эффективности его прогнозирования.

В данной работе предложена и исследована методика прогнозирования изменения среднего пробивного напряжения трансформаторного масла в маслопробойнике с применением безразмерного параметра:

$$\langle U_{\text{пр}} \rangle^* = U_{\text{пр},2i} / U_{\text{пр},1i}, \quad (1)$$

где $U_{\text{пр},2i}$, $U_{\text{пр},1i}$ – соответственно значения средних пробивных напряжений масла в маслопробойнике текущего и предшествующего значений измеряемого параметра на интервале времени i .

Физически параметр $\langle U_{\text{пр}} \rangle^*$ отражает относительное изменение среднего пробивного напряжения на интервале i .

В качестве объекта исследования выбраны автотрансформаторы и реакторы напряжением 500 кВ. Для этого оборудования по результатам эксплуатационных испытаний создана база данных, содержащая средние пробивные напряжения масла, его влажность и содержание механических примесей (класс чистоты). В результате проведенных исследований для прогнозирования изменения параметра $\langle U_{\text{пр}} \rangle^*$ предложен аналитический тренд:

$$\langle U_{\text{пр}} \rangle^* = 1 + b t_{\text{д}}^* + c (t_{\text{д}}^*)^d, \quad (2)$$

Здесь b , c , d – постоянные коэффициенты, определяемые по результатам опытов; $t_{\text{д}}^*$ – действительное время наблюдения за изменением пробивного напряжения масла в эксплуатации, $t_{\text{д}}^* = t_{\text{д}} / t_{\text{б}}$, где базисное время $t_{\text{б}}$ принято равным нормативному времени интервала между испытаниями, $t_{\text{б}} = 1$ год.

На рис. 1 представлены тренды изменения $\langle U_{\text{пр}} \rangle^*$, рассчитанные по (2) для трех фаз автотрансформатора напряжением 500 кВ, по которым определялась погрешность прогнозирования на последнем интервале. Для фаз А, В, С погрешность прогнозирования соответственно равна, %: 6,3; 1,5; 11,4. Анализ полученных результатов показал,

что различие погрешностей по фазам автотрансформатора обусловлено различием качества масел в этих фазах. Отмечается также, что применение предложенной методики позволяет более четко выделить области повышенного разброса пробивных напряжений в процессе эксплуатации оборудования.

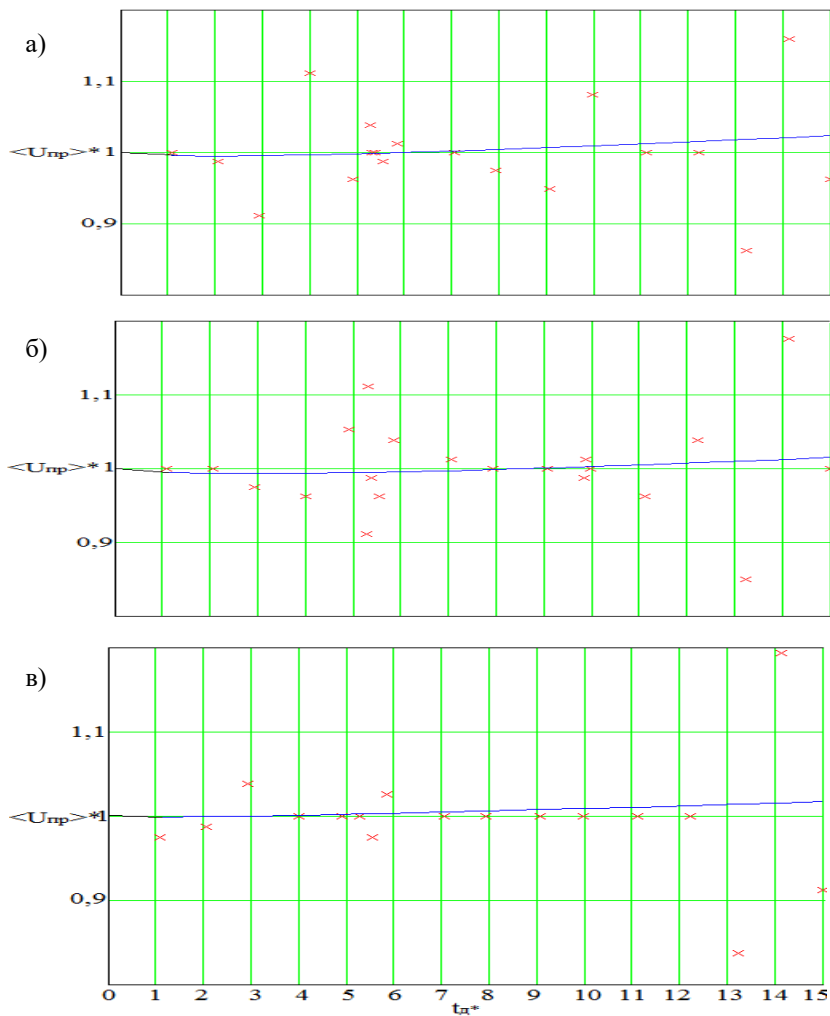


Рис. 1. Изменение относительного среднего пробивного напряжения $\langle U_{np} \rangle^*$ масла во времени автотрансформатора напряжением 500 кВ: а), б), в) – соответственно для фаз А, В, С; ——— – расчёт по тренду (2); x – эксперимент

*А.О. Матрохин, А.О. Почечуев, магистранты;
рук. В.Б. Харьковский, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАСКАДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

В тех случаях, когда ток нагрузки составляет величину до нескольких десятков миллиампер, для получения высокого постоянного напряжения целесообразно использовать умножитель напряжения – каскадный выпрямитель, позволяющий получить напряжение на нагрузке во много раз больше, чем дает трансформатор.

В ходе исследования был выполнен расчет и выбор всех элементов каскадного выпрямителя с преобразователем напряжения. Был изготовлен 3-х каскадный выпрямитель с транзисторным преобразователем напряжения на частоте 500 Гц. Схема каскадного выпрямителя показана на рис. 1. Использование высокой частоты существенно улучшает характеристики каскадного выпрямителя.

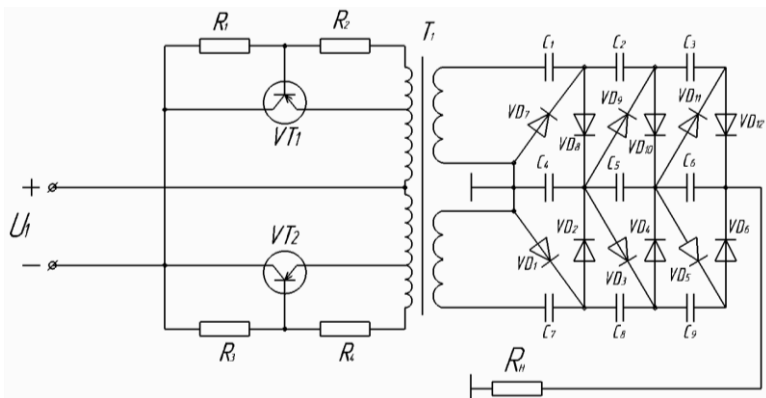


Рис. 1. Схема каскадного выпрямителя с транзисторным преобразователем

Были проведены экспериментальные исследования характеристик каскадного выпрямителя при работе одного, двух и трех каскадов.

Определены внешние характеристики (рис. 2), коэффициенты полезного действия, уровень пульсаций выходного напряжения.

Напряжение на нагрузке можно рассчитать с помощью формулы:

$$U_H = 2 \cdot n \cdot U_{2m} - \Delta U,$$

где n – число каскадов; U_{2m} – амплитуда напряжения выходной обмотки трансформатора; ΔU – снижение напряжения под нагрузкой.

$$\Delta U = -\frac{I_H}{6f \cdot c} \cdot (4n^3 + 3n^2 - n),$$

где I_H – ток нагрузки, А; f – частота, Гц; c – емкость конденсаторов, Ф.

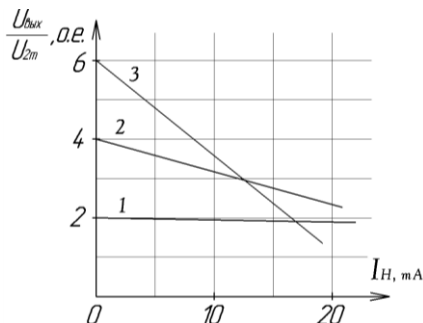


Рис. 2. Внешние характеристики каскадного выпрямителя при работе: 1 – одного каскада, 2 – двух каскадов, 3 – трех каскадов

Уровень пульсаций выходного напряжения δU зависит от тока нагрузки, числа каскадов и емкости конденсаторов:

$$\delta U = \frac{I_H}{f \cdot c} \cdot (n-1) \cdot n.$$

Проведенные исследования показали перспективность использования каскадного выпрямителя при малых токах и высоких напряжениях при частоте преобразователя 500 Гц.

Библиографический список

1. Костиков В.Г., Никитин И.Е. Источники электропитания высокого напряжения РЭА. – М.: Радио и связь, 1986. – 200 с.
2. Додик С.Д., Гальперина Е.И. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет. – М.: Советское радио, 1969. – 448 с.

*С.А. Зенькевич, Е.С. Богданов, магистранты;
рук. А.В. Вихарев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В настоящее время в городских электрических сетях доля силовых кабелей со сроком службы свыше 30 лет составляет более 60 %. В связи

с возрастанием повреждаемости таких кабелей при проведении испытаний повышенным напряжением, все больше энергетических предприятий отказывается проводить плановые профилактические испытания кабельных систем. При этом недостаточное внимание отводится методам испытаний на основе контроля электрофизических характеристик, а именно сопротивления, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции. Связано это, во-первых, со сложностью интерпретации полученных результатов, а во-вторых, с особенностями измерения параметров изоляции отдельных участков кабеля.

Наиболее широкое распространение в настоящее время для измерения характеристик высоковольтной изоляции получили измерители параметров изоляции и автоматические мосты переменного тока. Но при работе с данными приборами следует учитывать ряд особенностей. К таким особенностям можно отнести обязательное заземление токоведущих частей кабеля, не участвующих в измерении, а также использование охранных колец для исключения погрешности измерения из-за токов поверхностной утечки на концах кабеля. Несоблюдение этих требований может привести к значительным погрешностям при измерениях.

Для примера была проведена оценка влияния не экранированных элементов для кабеля АСБ-3х240 на 6 кВ. Анализ показал, что эквивалентная емкость не экранированных элементов близка по значению собственной емкости жилы.

Таким образом, погрешность измерения параметров изоляции может достигать 50 %. Эта погрешность будет увеличиваться при попытке измерить параметры изоляции части кабеля, например, вблизи соединительных муфт или концевых заделок.

Для изучения влияния экранирования элементов кабеля на погрешность при измерении параметров изоляции, в лаборатории кафедры смонтирован лабораторный стенд, включающий в себя силовой высоковольтный кабель и измерительный комплекс.

Содержание

Секция 12. Электрические системы

Карнаухов Н.С., Бунас К.В. Использование нейронных сетей при построении регулятора напряжения синхронного генератора; рук. Капустин А.Г.	3
Власов А.К. Инновационные методы управления электроэнергетическими системами; рук. Максимов Ю.П.	5
Лосев Д.Ю. Технология вложения систем как метод исследования статической устойчивости электрических систем; рук. Аллаев К.Р.	6
Исачкин В.А. Многофакторный прогноз узловой нагрузки ЭЭС; рук. Митрофанов И.Е.	8
Терещенко К.В. Моделирование характеристик синхронного двигателя в среде MATLAB R2016b; рук. Капустин А.Г.	10
Мышкина Л.С., Ивашкевич А.А. Композит – как средство повышения эффективности питающих сетей; рук. Бык Ф.Л.	12
Никифоров К.С. Анализ альтернативных вариантов строительства воздушной линии 220 кВ «Нижний Куранах – Томмот – Майя»; рук. Яковкина Т.Н.	14
Петров М.И., Рашитов П.А. Разработка опытных образцов индуктивно-емкостного МУПК; рук. Панфилов Д.И.	16
Петров М.И., Рашитов П.А. Разработка и исследование системы управления индуктивно-емкостного МУПК; рук. Панфилов Д.И.	18
Рахимов Дж.Б., К. Насыр у. О компьютерных технологиях в развитии электрических сетей; рук. Гусев Ю.П.	20
Тукаев С.М., Белоусова Н.А. Разработка устройства для определения направления повреждения участка сети путём анализа входящих и выходящих сигналов в отдельном объекте сети 6 – 10 кВ (РП/ТП); рук. Хузяшев Р.Г.	21
Никитина С.Д. Статическая устойчивость ЭЭС с управляемой линией электропередачи; рук. Голов В.П.	23
Чуркина Ю.О. Анализ влияния регулируемой продольной компенсации на статическую устойчивость электроэнергетической системы; рук. Мартиросян А.А.	25
Брындин А.А. Применение метода непрерывного динамического утяжеления для анализа статической устойчивости многомашинной ЭЭС; рук. Братолобов А.А.	26
Комухов А.А., Кустикова М.С. Определение настроечных коэффициентов АРВ генераторов Саяно-Шушенской ГЭС при наличии управляемого устройства продольной компенсации; рук. Мартиросян А.А.	27
Зотова М.В. Линии электропередачи с управляемой распределенной продольной емкостной компенсацией; рук. Мартиросян А.А.	29
Зиминова А.А., Рыжов Ю.Д. Исследование колебательной статической устойчивости ЭЭС с использованием программного комплекса Matlab; рук. Мартиросян А.А.	30
Градов Н.А., Скоропеева Е.С. Математическая модель регулируемой электроэнергетической системы для анализа статической устойчивости; рук. Кормилицын Д.Н.	31
Морыганов А.Е. Теоретические исследования условий возникновения феррорезонанса в сети 500 кВ; рук. Огорельцев Н.А.	32
Фирстов П.Е., Воробьева Е.А. Анализ и оценка эффективности функционирования существующей противоаварийной автоматики Тверской энергосистемы; рук. Мурзин А.Ю.	34
Новиков В.А., Наумов В.О., Колганов Н.С. Идентификация параметров воздушных линий электропередачи и силовых трансформаторов на базе синхронизированных векторных измерений; рук. Мурзин А.Ю.	36
Муравьева Е.Н. Моделирование однофазного АПВ в расчетах устойчивости ЭЭС; рук. Братолобов А.А.	38
Смирнов Е.В. Исследование устойчивости электроэнергетической системы с асинхронизированными генераторами; рук. Мартиросян А.А.	40

Коноплева Л.М., Кудрина В.Е. Анализ характеристик управляемых средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях; рук. Бушуева О.А.	41
Егоров В.А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи за счет внедрения инновационных проводов; рук. Бушуева О.А.	42
Макаров В.Д., Кривчикова А.С. Влияние коэффициента мощности нагрузки воздушных линий на наведенное напряжение в отключенной воздушной линии; рук. Братолобов А.А.	43
Шатохина Д.И. Определение токов симметричных коротких замыканий ЭЭС с управляемой линией электропередачи; рук. Кормилицын Д.Н.	45
Маслов Н.А. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенного напряжения; рук. Огорельшев Н.А.	46
Панферьев И.С. Исследование статической устойчивости ЭЭС состоящей из станции с двумя синхронными машинами, питающих общую нагрузку; рук. Мартиросян А.А.	48
Баринов Д.А. Исследование динамической устойчивости ЭЭС состоящей из станции с двумя синхронными машинами, питающих общую нагрузку; рук. Мартиросян А.А.	49
Введенский Н.Е., Казарин А.С. Динамическая устойчивость электроэнергетической системы с использованием комплексного управления блоком продольной компенсации; рук. Кормилицын Д.Н.	50
Фоменко Н.А. Исследование электрического поля высоковольтной линии электропередачи; рук. Мурзин А.Ю., Словесный С.А.	52
Сидоров А.В. Больше программ, хороших и разных; рук. Москвин И.А.	54
Разин Н.Н. Применение программного комплекса Matlab для моделирования электроэнергетических систем; рук. Огорельшев Н.А.	56
Ангельчева В.П., Кузнецов Н.Г., Корчагин В.П. Сравнительный анализ компактных воздушных линий электропередачи с линиями традиционного исполнения; рук. Бушуева О.А.	57

Секция 13. Электроснабжение

Калякин И.А. Анализ схемы электроснабжения промышленного предприятия с точки зрения потребителей энергии; рук. Андрианов Д.П.	59
Соколова И.А. Компенсация реактивной мощности как технология энергосбережения; рук. Петрова М.В.	61
Бусыгин С.Б. Автономные фотоэлектрические системы электроснабжения на основе генераторов с водородным первичным двигателем; рук. О.Е. Белов	63
Русяева М.Ю. Уменьшение пусковых токов многополюсных асинхронных двигателей за счет динамической компенсации реактивной мощности; рук. Артюхов И.И.	64
Джураев Ш.Дж. Моделирование нарушения качества электроэнергии в пакете MATLAB SIMULINK; рук. Тульский В.Н.	66
Квашнина Г.В. Сравнение способов анализа наработок на отказ систем электроснабжения; рук. Чащин Е.А.	67
Ольховский А.Е., Колесник И.В. Установки гарантированного питания статического типа; рук. Фоминич Э.Н.	69
Сафин Р.И., Степанова Е.М. Внедрение устройства и технологии управления линиями переменного тока (FACTS) в электроэнергетическую систему ПС 110/6 кВ; рук. Доломанюк Л.В.	71
Сухарев Д.Ю. Сравнительный анализ эксплуатационных качеств и технико-экономических показателей шкафов КРУ применяемых в АО «ВМЗ»	72
Петровский М.В. Анализ потребления электроэнергии в зависимости от различной специфики направленности учреждений; рук. Доманов В.И.	74
Саетгараев М.Р., Ахметшин А.Р. Повышение качества электроэнергии с помощью симметрирующих трансформаторов в РЭС 0,4 – 10 кВ; рук. Федотов А.И.	75
Шамарова Н.А. Повышения надежности и эффективности систем электроснабжения, включающих ветряные электростанции; рук. Крупнев Д.С.	77

Калечиц В.Н. Особенности выбора сечения проводников линии наружного освещения с учетом высших гармоник; рук. Козловская В.Б.	78
Смирнова А.С. Тригенерация: проблемы и перспективы применения; рук. Соколов М.И.	80
Иванова Н.С. Сравнение стандартов на качество электрической энергии в системах электроснабжения; рук. Бушуева О.А.	82
Гудков В.А., Тихомирова К.А., Молчагина К.Д. Режимы электрической сети района нагрязок с источником малой генерации; рук. Бушуева О.А.	84
Любимова А.О. Измерения и верификация энергетической эффективности; рук. Соколов М.И.	85
Чистякова А.В., Прокопьев И.В., Щелкунова О.С. Разработка учебного пособия с вычислительным практикумом по оптимизации параметров и структур систем электроснабжения; рук. Аржанникова А.Е.	86
Попова Е.А. Определение фактической загрузки элементов городской электросети; рук. Балдов С.В.	88
Максименко Е.А. Применение светодиодных источников света в уличном освещении; рук. Полкошников Д.А.	90
Пеньков В.А., Пирогова В.И., Румянцев Н.А. Способы сохранения электрической энергии, получаемой от возобновляемых источников; рук. Полкошников Д.А.	92
Мельникова П.О., Молчагина К.Д. Типы стабилизаторов напряжения и их применение для газового оборудования; рук. Полкошников Д.А.	94
Жеглов Т.К., Курилов Е.О. Энергосбережение в сетях потребителей с вентиляторными нагрузками; рук. Шульпин А.А.	96
Мухин А.И., Ивашина А.Н. Повышение эффективности использования автоматизированных систем учета электроэнергии с различными видами каналов связи; рук. Шульпин А.А.	97
Сотчева Р.С., Захаров Н.Е. Структура потерь электроэнергии в электрических сетях и ее анализ; рук. Шульпин А.А.	98
Науменко Е.В. Повышение эффективности использования электрической энергии за счет совершенствования систем управления в осветительных установках; рук. Балдов С.В.	99
Кузнецова Ю.А., Иванова М.В. Исследование влияния параметров сети на рабочие характеристики дуговой сталеплавильной печи; рук. Сорокин А.Ф.	100

Секция 14. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Чичикин В.А., Колесник И.В., Саенко С.С. Контроль состояния изоляции электрических сетей с изолированной нейтралью; рук. Тишков А.А.	103
Долгинин В.В. Развитие централизованной системы противоаварийной автоматики ОЭС средней Волги; рук. Мигунова Л.Г.	105
Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю. Управление маховиковым накопителем энергии; рук. Глускин И.З.	106
Ефремов Д.Г., Ефремова И.Ю. Пусковой орган противоаварийной автоматики по углю, выявление места и величины небаланса мощности в энергосистеме; рук. Глускин И.З.	107
Этингов Д.А., Бокарев И.В. Разработка алгоритма и программы для автоматической фазировки вторичных цепей цифровой дифференциальной защиты трансформатора; рук. Федосов Д.С.	109
Гийев Б.М. Способ реализации балансирующих команд на уровне 0,4 кВ; рук. Арцишевский Я.Л.	111
Колесников А.А., Вуколов В.Ю. Организация дифференциальной защиты распределительных сетей 6 – 35 кВ на основе метода двойной записи; рук. Куликов А.Л.	113
Жерновой Д.А., Колесник И.В., Горев О.А. Селективный контроль состояния изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью в электроустановках до 1000 В; рук. Фоминич Э.Н.	115

Бутикова М.А. Анализ работы резервной дистанционной защиты, использующей сумму токов нескольких питающих линий, при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения трансформатора; рук. Колесов Л.М., Можжухина В.В.	117
Двойников М.В. Анализ межвитковых КЗ в двухобмоточном трансформаторе и алгоритм их сигнализации на основе ДЗТ; рук. Фомичев А.А.	119
Ильяшенко И.Е. Создание математической модели дистанционной защиты линии с ответвлением, использующей токи питающих сторон, при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения трансформатора ответвления; рук. Колесов Л.М., Можжухина В.В.	121
Сидорова Л.В. Исследование динамических режимов работы токовых защит от замыканий на землю, выполненных с применением статических реле, в кабельных сетях 6 – 10 кВ; рук. Шуин В.А.	123
Нечаев Е.В., Шелудько М.В., Яблоков А.А. Исследование характеристик и оптимизация параметров датчика тока цифрового измерительного трансформатора тока; рук. Лебедев В.Д.	125
Тимофеев А.С. Разработка лабораторного эксперимента по определению места повреждения с использованием лабораторных стендов «Учебная техника»; рук. Филатова Г.А., Добрягина О.А.	126
Волков А.С. Анализ функционирования дистанционной защиты автотрансформатора, использующей токи сторон высшего и среднего напряжения, при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения; рук. Колесов Л.М., Можжухина В.В.	128
Андреев М.А. Анализ согласования дистанционных защит автотрансформатора и линий электропередачи; рук. Фролова О.В.	130
Басова А.Е. Анализ методики выбора уставок продольной дифференциальной токовой защиты; рук. Шуин В.А.	132
Борисова А.Н. Анализ величины тока небаланса в функции дифференциальной защиты микропроцессорных терминалов; рук. Фролова О.В.	133
Лебедев А.А., Лутохин А.А. Определение комплексного сопротивления при дуговом замыкании в конце ЛЭП для выбора полигональной характеристики первой ступени дистанционной защиты; рук. Фролова О.В.	135
Лебедева Д.А. Исследование неполнофазных режимов работы линий высокого напряжения при функционировании токовой защиты нулевой последовательности; рук. Фролова О.В.	137
Морозова К.Д., Строгов В.А. Разработка лабораторного стенда на основе терминала SIPROTEC 7SJ62/64; рук. Филатова Г.А., Кормушкин А.С.	139
Панащатенко А.В. Разработка и тестирование аппаратно-программного комплекса, реализующего синхронизированные векторные измерения в соответствии с IEEE C37.118; рук. Иванов И.Е., Литвинов С.Н.	141
Панащатенко А.В. Исследование алгоритмов синхронизированных векторных измерений с целью реализации стандарта IEEE C37.118; рук. Иванов И.Е., Лебедев В.Д.	143
Фролова Т.С. Методика выбора уставок резервных ступеней дистанционных защит на ЛЭП с односторонним питанием; рук. Шуин В.А.	145
Лебедева Н.В. Принципы выполнения компактного первичного преобразователя напряжения 6 – 10 кВ; рук. Шуин В.А., Лебедев В.Д.	147
Секция 15. Электротехника и электротехнологии	
Блинова Е.С. Высокотемпературные сверхпроводящие кабели; рук. Хуснутдинов Р.Р.	150
Елисеичев Е.А. Снижение коэффициента пульсаций в управляемом выпрямителе методом канальной коррекции управляющих импульсов; рук. Юдин А.В.	151
Кравцов И.П., Полоневич П.В. Анализ коррекции качества электрической энергии с использованием фильтра в системах электроснабжения автономных источников питания; рук. Суходолов Ю.В.	153

Кравцов И.П., Полоневич П.В. Определение достоверности контроля обмоток электрических машин; рук. Суходолов Ю.В.	155
Куликов К.И., Пономарев К.Е. Определение доли избыточной энергии рекуперации в метрополитене; рук. Спиридонов Е.А.	156
Никишкин Т.Г. Разработка портативного спектрометра гамма-излучения на основе PIN-диодов; рук. Чурсин С.С.	157
Полоневич П.В., Кравцов И.П. Спектральный метод контроля обмоток электрических машин; рук. Суходолов Ю.В.	158
Полоневич П.В., Кравцов И.П. Повышение точности определения временных параметров импульсных последовательностей; рук. Суходолов Ю.В.	160
Серов А.Н. Исследование влияния девиации частоты электросети на погрешность измерения амплитудного спектра; рук. Шатохин А.А.	161
Данилов А.С. Система корректировки работы трехфазного трансформатора при неравномерной нагрузке на фазы; рук. Шеманаева Л.И.	163
Лебедев А.Е. Экономичный цифровой амперметр для контроля больших токов; рук. Венедиктов С.В.	165
Серов А.Н. Применение квадратурной демодуляции для измерения амплитудного спектра; рук. Шатохин А.А.	167
Колчанов С.В. Мощный источник питания на полупроводниковых элементах; рук. Шеманаева Л.И.	169
Алейников А.В. Алгоритм управления синхронным электроприводом с улучшенными показателями по вибрациям; рук. Мартынов В.А., Голубев А.Н.	170
Большаков А.О. Микропроцессорная система измерения параметров индукционного нагрева; рук. Марков М.Г.	171
Борисова А.А. Исследование характеристик индукционного нагрева при термической обработке стальных изделий; рук. Долгих И.Ю.	174
Виноградова Т.М. Разработка и исследование датчика тока на базе пояса Роговского; рук. Марков М.Г.	175
Демиденко О.В. Оценка стабильности магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле магнитожидкостного герметизатора; рук. Сайкин М.С.	176
Зайцев Е.С. Разработка технологии пайки коаксиального измерительного шунта методом индукционного нагрева; рук. Лебедев В.Д.	177
Зуйкова Я.В. Численное исследование магнитожидкостного герметизатора установкой диффузионной сварки; рук. Сайкин М.С.	179
Кукушкин Ф.А. Комплексные исследования инверторного источника питания при изменении рабочей частоты; рук. Куликов К.В.	181
Лагуткина Д.Ю. Разработка магнитожидкостных датчиков угла наклона с улучшенными эксплуатационными характеристиками; рук. Сайкин М.С.	183
Майорова Л.С. Разработка и исследование тиристорных преобразователей с повышенной мощностью, совместимых с сетью; рук. Куликов К.В.	185
Сафонов С.Л. Разработка конструкции универсального индуктора для пайки коаксиального измерительного шунта; рук. Зайцев Е.С.	186
Шапина Ю.О. Электромагнитные характеристики индукционного нагрева при параметрической вариации плоского индуктора; рук. Долгих И.Ю., Корюкин Л.Б.	188
Юдин А.С. Моделирование системы передачи постоянного тока на преобразователях напряжения; рук. А.В. Макаров	190
Крюков А.В. Моделирование феррорезонансных схем распределительных устройств высокого напряжения; рук. А.В. Макаров	191
Секция 16. Электроэнергетика: прошлое, настоящее, будущее	
Абрамченко Е.В. Возникновение схемы замещения и ее значение в электротехнике; рук. Сбитнев С.А.	193
Дубинина Ю.С. История развития релейной защиты; рук. Сайкин М.С.	195

Зосимов И.А. История перехода от радиоламп к транзисторам; рук. Мартынов В.А.	196
Рафиков В.Р. История развития радиолокации; рук. Сайкин М.С.	198
Луньков И.А. Современные и перспективные источники распределенной генерации; рук. Савельев В.А.	200
Бобков Е.А. Анализ эффективности применения устройств FACTS для повышения пропускной способности ЛЭП СВН; рук. Савельев В.А.	202
Захаров Н.Е. Энергосбережение в электроэнергетике и в сфере потребления; рук. Савельев В.А.	204
Кофтаев Н.С. Анализ условий размещения ВЭУ и выбора их мощности; рук. Савельев В.А.	205
Кочкин П.С. Актуальность применения фазоворотных трансформаторов в электроэнергетических системах России; рук. Савельев В.А.	207
Кривчикова А.С. Использование водородных генераторов для выравнивания графика электрических нагрузок; рук. Савельев В.А.	209
Кузнецова Ю.А. Распределенная генерация на базе микротурбин; рук. Савельев В.А.	211
Лебедева Н.В. Развитие распределенной генерации; рук. Савельев В.А.	213
Меркулов А.Ю. Проблемы и задачи внедрения цифровой энергетики в России; рук. Савельев В.А.	215
Назаров А.О. Ограничение токов короткого замыкания на базе сверхпроводниковой технологии; рук. Савельев В.А.	217
Науменко Е.В. Термохимическая конверсия биомассы как энергосберегающая технология; рук. Савельев В.А.	219
Наумов С.А. Основные направления повышения эффективности применения асинхронных двигателей; рук. Савельев В.А.	221
Новиков В.А., Мошелева А.Н. Повышение наблюдаемости электрических сетей с помощью технологии синхронизированных векторных измерений; рук. Савельев В.А.	222
Прокопьев И.В. Распределенная генерация и проблемы ее реализации в частном секторе; рук. Савельев В.А.	224
Сахаров А.М. Распределенная генерация: тенденции развития и внедрение в ЕЭС России; рук. Савельев В.А.	226
Смирнова А.С. Тригенерация: проблемы и перспективы применения; рук. Савельев В.А.	228
Фролова Т.С. Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в странах ЕС; рук. Савельев В.А.	231
Щелкунова О.С. Многоукладная энергетика и ее перспективы развития; рук. Савельев В.А.	233

Секция 17. Электрооборудование и режимы электрических станций и подстанций

Баран А.Г. Оценка электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительного устройства 110 кВ действующей подстанции 110/10 кВ; рук. Пономаренко Е.Г.	235
Баран А.Г., Климович И.П. Оценка влияния угла начальной ориентации элементов шинной конструкции с жесткой ошиновкой на параметры электродинамической стойкости; рук. Сергей И.И.	237
Чеботарёв А.Д. Системы мониторинга и диагностики силовых трансформаторов; рук. Гарифуллин М.Ш.	239
Хафизова Г.М., Хафизов А.А. Способы размещения компенсирующих устройств в распределительных сетях сетевых организаций; рук. Шакиров Ю.И.	241
Махмудов Т.Ф. Внедрение асинхронных турбогенераторов в современные электрические системы	243
Махмудов Т.Ф. Несимметричные короткие замыкания в синхронном и асинхронном турбогенераторах	245
Петров Н.Н. Анализ возникновения повторных зажиганий дуги в вакуумном выключателе при отключении индуктивных элементов в сети 35 кВ; рук. Евдокунин Г.А.	246

Комаров Е.А., Струцкий А.А. Перспективы гашения дуги постоянного тока в аппаратах среднего напряжения; рук. Гилёв А.А.	248
Саубанов Р.И. Проблема надёжности работы устройств РПН силовых трансформаторов; рук. Гарифуллин М.Ш.	251
Фомин М.М. Реализация программных средств анализа внешнего магнитного поля асинхронного двигателя с целью контроля состояния обмотки ротора; рук. Скоробогатов А.А.	253
Гаврилов В.А. Механический расчет проводов и тросов воздушных линий электропередачи с учетом пластических деформаций; рук. Ильичев Н.Б.	256
Голубева К.А. Распределенная делительная автоматика на ТЭС; рук. Савельев В.А.	258
Гончаров А.С. Оценка уровней токов при синхронизации шестифазного генератора с сетью; рук. Лапшин В.М.	259
Иванов М.В. Мониторинг состояния обмоток силового трансформатора по значению сопротивления короткого замыкания; рук. Савельев В.А.	261
Пешерова С.А. Диагностика высоковольтных выключателей; рук. Рассказчиков А.В.	263
Страхов А.С., Новоселов Е.М., Коновалов Н.Н. Разработка анализатора спектра для функционального контроля состояния асинхронных двигателей; рук. Скоробогатов А.А.	265
Новоселов Е.М., Литвинов С.Н., Страхов А.С., К вопросу существования внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей; рук. Скоробогатов А.А.	267
Макарушин Д.А. Регулирование производительности вращающихся рабочих машин в системе собственных нужд электрических станций; рук. Лапшин В.М.	269
Сопин Е.Г. Сравнительный анализ национального стандарта и стандарта МЭК по расчету токов короткого замыкания в системе собственных нужд электростанций; рук. Лапшин В.М.	271
Зайцев Л.А. Контроль состояния стержней обмотки ротора по току статора; рук. А.А. Скоробогатов	273

Секция 18. Высоковольтная электроэнергетика и электротехника

Данилин К.В. Исследование остаточных физико-механических свойств бумажной изоляции после термодеструкции в различных изоляционных жидкостях; рук. Гарифуллин М.Ш.	275
Чебрякова Ю.С., Шилов И.И. Способ электрошумовой диагностики высоковольтного оборудования	276
Факеев И.С. Технические мероприятия по исключению и демпфированию высокочастотных перенапряжений, воздействующих на кабели высокого напряжения; рук. Лавров Ю.А.	278
Ба Бораик А.М. Контроль дефектов в изоляции обмотки статора турбогенераторов в онлайн и офлайн режимах; рук. Усачев А.Е.	280
Ба Бораик А.М. Зависимость формы и амплитуды частичных разрядов от параметров схемы регистрации; рук. Усачев А.Е.	281
Маркова Н.О. Оценка влияния различных факторов на величину аperiodической составляющей в отключаемом токе; рук. Петрова Н.Ф.	282
Пичугин В.А. Разработка аппаратных мер по ограничению высокочастотных перенапряжений, воздействующих на изоляции подстанционного оборудования; рук. Лавров Ю.А.	283
Старостина Я.К. Энергетически эффективные цепи защиты пускорегулирующего устройства от коммутационных перенапряжений; рук. Сидоров С.Н.	285
Торпищев А.Р. Ограничение грозовых перенапряжений, воздействующих на изоляцию газонезащищенных линий; рук. Лавров Ю.А.	287
И.Н. Белов Определение габаритных размеров подстанции и автоматизированный расчет молниезащиты; рук. Максимов Ю.П.	289

Tankoy A. La recherche d'une forme de tension à la sortie d'un convertisseur à semi-conducteur dans un réseau local haute tension de haute fréquence; рук. Sokolov A., Shadrikov T.	291
Максимов В.С. Изменения статистических характеристик пробивных напряжений в маслопробойнике в зависимости от номера пробоя; рук. Мельникова О.С.	293
Сентюрев Д.С. Оптимизация элементов схемы регистрации частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования; рук. Словесный С.А.	295
Соболев А.Ю. Прогнозирование изменения пробивного напряжения масла для трансформаторного оборудования напряжением 500 кВ в эксплуатации; рук. Митькин Ю.А., Вихарев А.В.	297
Матрохин А.О., Почечуев А.О. Источник постоянного тока высокого напряжения с использованием каскадного выпрямителя; рук. Харьковский В.Б.	299
Занькевич С.А., Богданов Е.С. Особенности измерения параметров изоляции при диагностике силовых высоковольтных кабелей; рук. Вихарев А.В.	300

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ЭНЕРГИЯ-2017»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

*Составители Макаров А.В., Шадриков Т.Е.
Компьютерная верстка Фомичевой А.В.
Печатается в авторской редакции*

Подписано в печать 23.03.2017. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,02.
Тираж 100 экз. Заказ № .
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
энергетический университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.